Ing. WERNER NÜRNBERG

ISPITIVANJE ELEKTRIČKIH STROJEVA

S njemačkog preveo
Ing. RADENKO WOLF

ZAGREB
„ŠKOLSKA KNJIGA"
1951

Naslov originala

DIE PRÜFUNG
ELEKTRISCHER MASCHINEN

von

Dipl. Ing. WERNER NÜRNBERG

Berlin 1940

PREDGOVOR PREVODIOCA

Djelo W. Nürnberga namijenjeno je studentima tehnike, inženjerima u praksi, tehničarima, a mnoga će poglavlja poslužiti čak i industrijskim poslovođama. Ono obrađuje ne samo metode ispitivanja električkih strojeva, nego i toliko teorije električkih strojeva, koliko je potrebno, da bi čitalac mogao s razumijevanjem pratiti izlaganja. Kao vrijedno i iscrpno djelo o ispitivanju električkih strojeva, ono će ispuniti prazninu, koja se u našoj tehničkoj literaturi na tom području osjećala.

Terminologija u ovom prijevodu uzeta je prema Elektrotehničkom rječniku, koji izdaje Zavod za visoki napon Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Gdje god je bilo moguće, promijenjene su i računske oznake i indeksi u duhu našeg jezika; to nije provedeno kod internacionalno razumljivih ili prihvaćenih oznaka.

U tabeli grupa spojeva transformatora uz prije upotrebljavane oznake, koje se još nalaze na mnogim transformatorima u pogonu, unesene su i nove, internacionalno prihvaćene oznake, te su u tekstu stare oznake zamijenjene novima.

Kod gradnje i upotrebe električkih strojeva prijeko je potrebno, da postoje i da se održavaju određeni propisi i pravila, ako želimo izbjeći ne samo nesporazume i sporove, već i štetu i opasnost po ljudski život. Kod ispitivanja električkih strojeva često je potrebno uspoređivati dobivene rezultate s propisanim vrijednostima, a često je potrebno propisati točno i sam način ispitivanja. U takvim slučajevima poziva se autor u originalu na VDE-propise (propise Saveza njemačkih elektrotehničara), i to specijalno na poglavlja REM i RET (pravila za ocjenu i ispitivanje električkih strojeva, odnosno transformatora). Ovi su propisi, odnosno pravila prije rata kod nas općenito vrijedila, a u pomanjkanju drugih, upotrebljavaju se u tvorničkoj praksi još i sada, dok ih ne zamijene novi, naši propisi, koji će uzeti u obzir mogućnosti suvremene tehnike i specifične naše potrebe. Kako je prijeko potrebno upozoriti čitaoca ne samo na to, da propisi moraju postojati, nego i gdje i u kojem smislu su oni potrebni, to su i u prijevodu ta upozorenja ostavljena. Ona će jednako vrijediti i onda, kad budu izrađeni naši propisi, uz eventualne male izmjene.

U Zagrebu, 1. XII. 1950.

Ing. Radenko Wolf

SADRŽAJ

II. dio

Specijalno ispitivanje strojeva

III. dio

Mjerni instrumenti i metode mjerenja

UVOD

Ispitivanje električkih strojeva ima prije svega svrhu, da ustanovimo potrebnu električku i mehaničku čvrstoću, obilatost u termičkom pogledu, preopteretivost i tehničke podatke, u koje spadaju kao najvažniji korisnost i faktor snage. Pokusom praznog hoda određujemo magnetske prilike duž puta silnica korisnog toka i uže gubitke praznog hoda. Kod pokusa kratkog spoja ispitujemo prilike putova rasipa, reakciju armature i dodatne gubitke. Pokusi opterećenja protežu se na snimanja karakteristika uzbude, napona stezaljki i brzine vrtnje u zavisnosti u promjenljivom opterećenju, te kod pokusa trajnog pogona na određivanje nadtemperature kod normalnog opterećenja. Kod motorâ, koji kreću sami, mjerimo zakretni moment dok motor stoji, kao i za vrijeme zaleta, pri čemu vrlo mnogo upotrebljavamo pokus zaleta. Za razradu rezultata potreban nam je zamašni moment, koji većinom određujemo pokusom zaustavljanja. Svi strojevi s kolektorom, dakle istosmjerni kao i trofazni i jednofazni kolektorski strojevi treba da prođu prije početka pravih mjerenja udešavanje, kojemu je cilj odrediti neutralni položaj nosača četkica, te ispravan fazni položaj napona za regulaciju brzine vrtnje i faktora snage. Kod mnogih od ovih strojeva točnost ovog udešavanja odlučno utječe na ispravan rad. Ispitivanja vibracija, šumova i ventilacije upotpunjuju kod novih generatora i motora čisto električka ispitivanja. Čitav niz ispitivanja ponavlja se kod različitih vrsta strojeva na isti način, te ih zato obrađuje prvi dio »Opće ispitivanje strojeva« zajednički. Drugi dio sadrži tada »Specijalno ispitivanje strojeva«, i to transformatora, trofaznih strojeva, istosmjernih i izmjeničnih kolektorskih strojeva. »Mjerni instrumenti i metode«, koje upotrebljavamo osobito u praktičkom pogonu u ispitnim stanicama za mehanička i električka ispitivanja, obrađeni su ukratko u trećem dijelu, a u dodatku su sabrane najvažnije formule, koje kod ispitivanja uvijek iznova upotrebljavamo.

I. DIO

OPĆE ISPITIVANJE STROJEVA

A. MJERENJE OTPORA

Ispitivanje isporučenog stroja započinjemo najzgodnije mjerenjem otpora pojedinih namota. Usporedba izmjerene vrijednosti sa pravom, općenito unaprijed izračunatom vrijednosti otkriva nam odmah grube griješke. Osim toga služi nam hladna vrijednost otpora za naknadno određivanje prirasta temperature namota nakon trajnog opterećenja. Odgađamo li mjerenje hladnog otpora, ne ćemo moći izbjeći neprilično čekanje do potpunog ohlađenja.

Praktičko mjerenje ravna se prema veličini otpora. Najmanje vrijednosti otpora, kao kod armatura istosmjernih strojeva, serijskih uzbudnih namota, namota pomoćnih polova i kompenzacionih namota, koje leže ispod 0,001 Ω najbolje ćemo odrediti mjerenjem struje i napona.

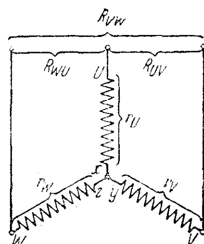
Veće otpore, t. j. one od 0,001 do 1,0 Ω, određujemo Thomsonovim mostom. Vrijednosti iznad 1,0 Ω mjerimo Wheatstoneovim mostom. U isto vrijeme mjerimo termometrom temperaturu namota. To je potrebno već i zbog jake ovisnosti otpora o temperaturi. Osim toga treba nam ova vrijednost temperature i kod izračunavanja nadtemperature. Mjerenje temperature izvest ćemo najpomnije s pomoću tekućinskih termometara, ugrađenih u glave ili među slojeve namota. Ako se zadovoljimo time, da očitamo temperaturu prostorije, treba računati s mogućim odstupanjem između namota i prostorije od nekoliko stupanja Celzija. Osobito zaostaju svi zatvoreni strojevi za promjenama temperature u prostoriji.

Kod mjerenja otpora treba paziti, da svi upotrebljavani kontakti, kako mjerni vodovi, tako i krajevi namota, imaju dobru, glatku površinu, i da su eventualne spojnice dobro pritegnute. One veze, koje kvare ispravan rezultat mjerenja, treba naravno ukloniti.

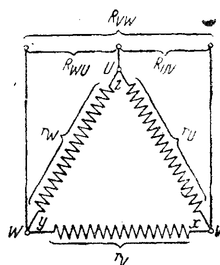
Mjerna struja, koju kod pojedinih mjernih metoda šaljemo kroz namote, izaziva u njima nepoželjno zagrijavanje. Pogreška, koja zbog toga nastaje, ne prelazi dopuštene granice, ako kod mjerenja ne prekoračimo 1/10 do 1/5 nominalne jakosti struje dotičnog namota.

Ponovno mjerenje istog otpora, osobito kod kasnijeg određivanja tople vrijednosti, moramo izvesti istom metodom, koju smo prije upotrebili, a osim toga i jednakom osjetljivošću. Kod mjerenja mostom, treba dakle upotrebljavati iste standardne otpornike, a kod mjerenja struje i napona istu jakost struje. Na taj način radimo kod svih mjerenja s istom točnošću i s istim pogreškama. Procentualno povećanje otpora odredit ćemo tada vrlo točno, iako je apsolutna vrijednost u omima izmjerena s neznatnim odstupanjem od pravog iznosa.

Trofazni namoti. Namoti transformatora, asinhronih i sinhronih strojeva obično su međusobno spojeni. Ako je lako odvojiti faze jednu od druge, preporučuje se izmjeriti otpor svake pojedine faze, uz naznaku, kojoj fazi pripada. Ako pak imamo nerazrešivi spoj u zvijezdu, možemo mjeriti samo sume otpora po dvije faze. Pojedine vrijednosti po fazi dobivamo jednostavnim pomoćnim računom, uz oznake prema sl. 1.:



Sl. 1. Mjerenje otpora kod spoja u zvijezdu



Sl. 2. Mjerenje otpora kod spoja u trokut

$$r_u = \frac{1}{2}(R_{uv} + R_{wu} - R_{vw}), \quad r_v = \frac{1}{2}(R_{vw} + R_{uv} - R_{wu}),$$

$$r_w = \frac{1}{2}(R_{wu} + R_{vw} - R_{uv}).$$

Kod mjerenja otpora u spoju trokut, treba pojedine vrijednosti također tek računski odrediti, te dobivamo uz oznake prema sl. 2:

$$r_u = \frac{1}{2}\left(\frac{4\,R_{vw}R_{wu}}{-R_{uv} + R_{vw} + R_{wu}} - [-R_{uv} + R_{vw} + R_{wu}]\right),$$

$$r_v = \frac{1}{2}\left(\frac{4\,R_{wu}R_{uv}}{+R_{uv} - R_{vw} + R_{wu}} - [+R_{uv} - R_{vw} + R_{wu}]\right),$$

$$r_w = \frac{1}{2}\left(\frac{4\,R_{uv}R_{vw}}{+R_{uv} + R_{vw} - R_{wu}} - [+R_{uv} + R_{vw} - R_{wu}]\right).$$

Ako nema bitnog odstupanja između tri među stezaljkama izmjerene vrijednosti R_{st}, dovoljno je navesti fazni otpor kao:

$$R_f = \frac{1}{2} R_{st} \text{ kod spoja u zvijezdu,}$$

$$R_f = \frac{3}{2} R_{st} \text{ kod spoja u trokut.}$$

Kod dvopolnih jednoslojnih namota može zbog različitih istaka glava namota

u pojedinim fazama lako doći do razlike u vrijednostima otpora od nekoliko postotaka. To dakle općenito ne znači pogrešku u izvedbi namota.

Otpor rotorskog namota asinhronih motora i uzbudnog namota sinhronih strojeva određujemo tako, da prislonimo mjerne vodove na klizne kolute, da ne bismo mjerili prijelazni otpor i otpor samih četkica. Ovu posljednju vrijednost ne određujemo mjerenjem, već je uzimamo u obzir padom napona, koji zbog nje nastaje. Pritom vrijedi, bez obzira na jakost struje, 1,0 V za ugljene četkice, a 0,3 V za vrste četkica, koje sadrže metala.

Otpor kratko spojenih kaveza svake vrste, u koje ubrajamo i prigušne kaveze, ne mjerimo. Jedino ako se na temelju samih mjerenja opterećenja pojavi opravdana sumnja, da je upotrebljen krivi materijal, treba odrediti vodljivost na pokusnom komadu.

Istosmjerni namoti. Kod mjerenja otpora uzbudnog namota za porednu i nezavisnu uzbudu nema poteškoća. Kod manjih strojeva većinom upotrebljavamo Wheatstoneov, a kod većih Thomsonov most.

Teže je određivanje otpora namota pomoćnih polova, kompaundne uzbude i kompenzacionog namota, kroz koje teče struja armature. Hladne vrijednosti dobivamo često do 50% prevelike u usporedbi s izračunatim vrijednostima, kod kojih nismo uzeli u obzir otpor spojnih dijelova između pojedinih svitaka, kao ni prijelazne otpore, koje ne možemo izbjeći ni kod najboljeg načina spajanja. Vrući otpori leže naprotiv često prenisko u usporedbi s rezultatima određivanja temperature termometrom. Razlog su tome dijelom dodatni otpori, koji se katkada drugačije zagrijavaju, a dijelom dobro, brzo hlađenje svitaka, izvedenih često neizolirano, zbog čega topla vrijednost otpora naglo pada.

Mjerenje otpora armature zahtijeva veliku pomnju. Pod ovom vrijednošću razumijevamo otpor između dvije lamele na kolektoru, razmaknute točno za jedan polni korak, pri pogonskom spoju armature. Ovaj imamo uvijek onda, kad sve četkice leže na kolektoru. Ako armatura ima dovoljno spojeva izjednačenja, kao što je to obično kod petljastog namota velikih strojeva, možemo otpor odrediti i bez četkica. Kod spuštenih četkica rezultat mjerenja koleba u uskim granicama zbog prekrivanja više ili manje lamela, koje se mijenja s položajem armature. Za usporedbu s proračunatom vrijednošću ovakvo mjerenje dostaje, dok za izračunavanje povećanja otpora nije uvijek pouzdano. Točnije vrijednosti dobivamo kod jednovojnih namota, ako označimo dvije susjedne lamele kolektora, te mjerimo hladni i topli otpor među njima. Ova vrijednost tek malo zavisi o položaju armature. Najbolje je zakrenuti rotor tako, da označene lamele leže prilično točno između dva svornika nosača četkica. Struju moramo uzeti znatno manju nego kod druge metode mjerenja, jer se struja mjerenja praktički ne razgranjuje, već teče najvećim dijelom kroz svitak armature između obiju lamela. Besprikorne rezultate mjerenja dobivamo, pa i

kod mjerenja na polnom koraku, ako četkice skinemo, no ovakov postupak već sam po sebi ne možemo kod većih strojeva dopustiti.

Namoti jednofaznih i višefaznih kolektorskih strojeva. Statorski namoti ovih strojeva odgovaraju po sastavu i spoju ili namotima istosmjernih strojeva, ili asinhronih strojeva. Vrijedi dakle ono, što smo već tamo rekli. Često je, međutim, kako bi broj stezaljki sveli na najnužnije, unutar stroja već izvedeno spajanje svitaka, koji prema spoju spadaju zajedno. Tako su na pr. kod višefaznih kolektorskih strojeva s pomoćnim polovima namot pomoćnih polova i kompenzacioni namot nerazrješivo spojeni u seriju. U takvu slučaju mjerimo ukupni otpor i na odgovarajući način točno navodimo svitke, na koje se odnosi. Namot armature ovih strojeva identičan je s namotom armature istosmjernog stroja, te ga mjerimo, kao i tamo, na polnom koraku (= 180° el). Kod izračunavanja korisnosti, preračunamo ovu vrijednost otpora jednostavnim računom na pojedine faze. Ako je u utorima armature smješten još i posebni trofazni namot, mjerimo i njegov otpor između tri ili šest kliznih koluta. Ukoliko su izvedene spojnice s otporom, koje se nalaze između glave namota i lamele kolektora, te služe za smanjenje struja kratkog spoja pod četkicama, treba to uzeti u obzir. U tom slučaju treba glavu namota iznad zastavice očistiti od izolacije i upotrebiti kao mjernu točku. Spojnicu s otporom treba onda još zasebno izmjeriti s umjerenom strujom. Kod većih vrijednosti struje mogla bi lako izgorjeti.

B. IZOLACIONA ČVRSTOĆA

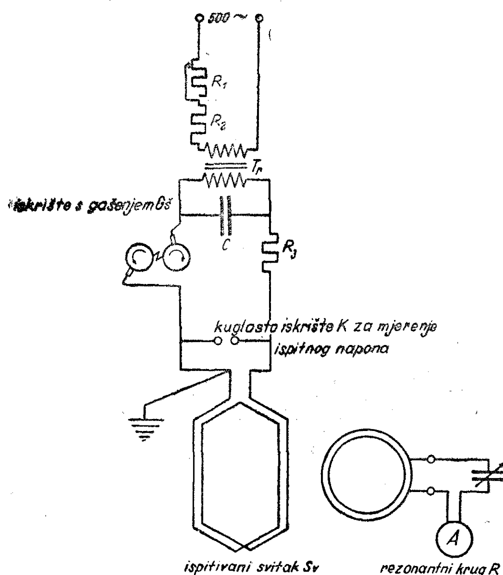
Ispitivanje izolacije prema propisima (REM), koje izvodimo po mogućnosti na toplu stroju, sastoji se od naponskog pokusa na namotu, pokusa strmim valovima i naponskog pokusa među zavojima. U praksi pridolazi k tome ispitivanje visokom frekvencijom.

Naponski pokus na namotu služi nam, da ustanovimo, da li dostaje čvrstoća izolacije namota međusobno i prema željezu. Izmjenični napon, koji je određen propisima (REM i RET), spojimo jednim polom na namot, koji treba ispitati, a drugim polom na željeznu konstrukciju stroja, odnosno na zajedno spojene preostale grupe svitaka. Napon daje mali ispitni transformator, koji je primarno priključen preko regulacionog otpornika na izmjenični napon od 220 ili 380 V. Polaganim povećavanjem reguliramo ga do propisanog iznosa i ostavimo tako jednu minutu. Kod eventualna oštećenja izolacije, otklon voltmetra padne gotovo do nule. Mjesto grijeske možemo većinom naći po pucketavu šumu ili čak po vidljivu luku.

Pokus strmim valovima prema propisima (REM i RET) izvodimo na gotovim strojevima iznad 2,5 kV napona. Budući da se je u praksi pokazalo, da ovo ispitivanje može, izuzev kod transformatora, tako pokvariti izolaciju,

koja je bila sama po sebi dobra, da dolazi do smetnji nakon stavljanja u pogon, odustajemo od ovog pokusa sporazumno s naručiteljem.

Namjesto toga vršimo **pokuse visokom frekvencijom**, koji omogućuju da ispitamo svitak prije ugradnje s punim linijskim naponom na krajevima. Na sl. 3 vidimo jedan od uređaja, koje upotrebljavamo u praksi. Iz mreže od 500 Hz uzimamo napon, koji možemo regulirati, transformiramo ga u transformatoru *Tr* na nekoliko kV, te dovodimo kondenzatoru *C*. Paralelno s ovim spojen je ispitivani svitak *Sv* preko iskrišta s gašenjem Gš i otpornika za ograničenje struje R_3. Jedna stezaljka svitka je uzemljena. Mijenjanjem razmaka u iskrištu s gašenjem možemo uz dovoljno velik napon na kondenzatoru udesiti bilo koji preskočni napon između 1000 i 10.000 V i dovesti ga ispitivanom svitku. U času preskoka počinje pojava titranja u krugu, koji sačinjava kondenzator *C* i svitak *Sv*. Ova iščezava iza nekoliko perioda, i počinje odmah iznova, čim je napon na kondenzatoru opet dovoljno porastao. Tokom ispitivanja dovodimo svitku nekoliko tisuća nizova valova s frekvencijom od 10.000 do 100.000 *Hz*. Slabo spregnut rezonantni krug služi za pokazivanje svitaka s probijenim, kratko spojenim zavojima. Ovakvi svici kvare rezonanciju obaju krugova, te ih prepoznajemo po jako smanjenom otklonu ampermetra. Točnu vrijednost ispitnog napona, koji udesimo tako, da mu tjemena vrijednost bude $\sqrt{2}$-struki linijski napon stroja, možemo mjeriti kuglastim iskrištem *K* spojenim paralelno sa svitkom *Sv*.



Sl. 3. Ispitivanje visokom frekvencijom s punim naponom stroja na oblikovanom svitku

Naponski pokus među zavojima služi za određivanje kvaliteta izolacije između zavoja istog namota. Izvodimo ga prema propisima (REM i RET) sa 1,3-, 1,5- ili 2-strukom vrijednošću normalnog napona po zavoju. Najjednostavniji je način, koji se u praksi ispitnih stanica najviše upotrebljava, da tokom mjerenja u praznom hodu kod snimanja karakteristike magnetiziranja dovedemo stroj na povećani napon, bilo jačom uzbudom, bilo povećanjem napona mreže. Ako stroj istovremeno tjeramo povećanom brzinom vrtnje — koju možemo postići bržim tjeranjem stroja ili poveća-

njem frekvencije mreže, a što je uvijek propisano iz mehaničkih razloga — možemo na taj način često zaobići znatnije povećanje magnetskog toka kod izvođenja ovog pokusa. Stroj tada radi gotovo s normalnim zasićenjem. Kod procentualno većih povećanja brzine vrtnje bit će i manje nego normalno zasićen. Pokus traje 3 minute, dok su za pokus s povećanom brzinom vrtnje propisane 2 minute.

Apsolutna vrijednost izolacionog otpora u omima nije prema gornjim ispitivanjima još poznata. Da je izmjerimo, upotrebljavamo jednostavnu metodu struje i napona, t. j. mjerimo struju, koja prolazi kod poznatog priključenog istosmjernog napona, i to većinom kod 500 V. Kao izvor napona služi na pr. ručni induktor prikladne izvedbe ili postojeća istosmjerna mreža. Vrijednost izolacionog otpora kreće se od nekoliko stotina tisuća do nekoliko milijuna oma. Ona vrlo mnogo zavisi o vlažnosti stroja.

Kod novo montiranih strojeva ili nakon stanki u pogonu od nekoliko dana, ta vrijednost često leži niže, ali kod grijanja strujom ili kod vanjskog dovoda topline brzo poraste. Kod kontrole vrijednosti na licu mjesta treba uzeti u obzir vlažnost i nečistoće na priključnoj pločici i na kolektoru, jer to može biti razlog, da se vrijednost izolacionog otpora samih namota čini premalenom.

C. SMISAO NAMATANJA I OS NAMATANJA

Smisao namatanja i os namatanja svitaka u električkim strojevima određuju smjer i prostornu os magnetskih polja, što ih ti svici proizvode, kad kroz njih teče struja. Isto tako određuju oni vremenski položaj napona, koji se u svicima induciraju. O ispravnosti ovih odnosa zavisi ispravan rad stroja.

Uzbudni namoti istosmjernih strojeva. Ako na glavnim polovima imamo samo jedan uzbudni namot, dovoljno je da ispitivanjem pri uzbuđenom namotu ustanovimo izmjeničan redoslijed polova, koji se podudara s nacrtom. Stezaljke *C-D,* odnosno *I-K* kod nezavisne uzbude ili *E-F* kod serijske uzbude spojimo s izvorom struje. Zatim pojedinim polnim nastavcima polako približavamo vrtivo smještenu magnetsku iglu. Sjeverni pol privlači šiljak, koji pokazuje na jug, a južni pol šiljak, koji pokazuje na sjever. Uz ispravan spoj svitaka treba da se šiljci igle prema tome naizmjence priklanjaju. Ako iglu odviše naglo približimo, ona se može premagnetizirati, što naravno daje pogrešan otklon. Navodimo kratko pravilo smjera: ako gledamo površinu polnog nastavka, onaj pol, koji uzbudna struja optječe na desno — u smjeru kazaljke na uri — bit će južni pol, a pol, koji uzbudna struja optječe na lijevo — nasuprot smjeru kazaljke na uri — bit će sjeverni pol.

Ako stroj ima više uzbudnih namota, onda najprije ispitamo jedan od njih, kao što je gore opisano. Preostale ćemo onda najbolje izmjeriti induk-

tivnom metodom. To međutim služi samo kao kontrola ukupnog djelovanja pojedinih uzbudnih krugova na stroj. Ako sumnjamo, da su pojedini polovi krivo spojeni, onda treba i preostale namote pojedinačno ispitati magnetskom iglom. Imamo li na polovima osim samouzbude *C-D* još i serijsku uzbudu *E-F* i nezavisnu uzbudu *I-K*, to je spajanje i označivanje stezaljki ispravno samo onda, ako svi namoti uzbuđuju stroj u istom smislu, kad struja ulazi svuda na stezaljku, označenu slovom, koje dolazi prije po alfabetskom redu. To dakle znači: uz isti polaritet stezaljki *C, E i I* moraju se sva tri namota potpomagati. Induktivna metoda osniva se na razmatranju, da se kod promjene zajedničkog magnetskog toka moraju u svim svicima inducirati naponi istog smjera. Priključimo dakle na pr. na stezaljke *C, E* i *I* (+)-stezaljku, a na stezaljke *D, B* i *K* (—)-stezaljku osjetljiva voltmetra. Kroz jedan od namota šaljemo uzbudnu struju, koju uzimamo iz mreže preko regulacionog otpornika, pri čemu pazimo na ispravan otklon instrumenta na dotičnom svitku. Kod uklapanja moraju svi voltmetri dati otklon u istom smislu. Kod isklapanja struje pokazuju pak voltmetri uzbudnih namota, kroz koje ne teče struja, obrnuti otklon. Kao kratko pravilo može nam poslužiti ovo: »Početne stezaljke ispravno označenih uzbudnih namota pokazuju kod uklapanja jedne od uzbudnih struja sve međusobno isti polaritet.« Pokazuje li jedan od namota krivi polaritet, treba promijeniti oznake stezaljki. Izričito treba napomenuti, da unutarnjim spajanjem stroja smisao uzbude još uvijek možemo okrenuti tako, da ona jača ili slabi polje. Ako na pr. kompaundni namot treba da povećava napon, mora struja ulaziti na *E*, a izlaziti na *F*, ako je u isto vrijeme samouzbuda spojena tako, da *C* leži na (+), a *D* na (—). Kod obrnutog prolaza struje namot će slabiti polje.

Uzbudni namot sinhronih strojeva ispitujemo isto kao kod istosmjernih strojeva. Većinom razabiremo već samim pregledom smišao namatanja, a s time i smisao uzbude pojedinih svitaka, koji su gotovo uvijek spojeni u seriju. Nakon pola optjecanog nalijevo slijedi pol optjecan nadesno, kao što odgovara izmjeničnom redoslijedu sjevernih i južnih polova. U slučaju da kod fabrikacije sve uzbudne svitke izrađujemo jednako i označujemo sa *P* početak, a sa *S* svršetak, onda je ispravan spoj *S* sa *S, P* sa *P,* i t. d.

Namot armature kolektorskih strojeva. Os mu je određena isključivo prostornim položajem četkica na kolektoru. Ove se kod istosmjernih strojeva nalaze u t. zv. neutralnom položaju onda, kad stoje, gledajući ih električki, točno okomito na os polja glavnih polova. Ako ih gledamo prostorno, ležat će međutim — zbog pomaka lamele kolektora prema pripadnom vodiču armature za cca polovinu polnog koraka — gotovo točno pod sredinom glavnih polova (str. 194). Ma da neutralni položaj četkica iz stanovitih razloga u pogonu katkada ne zadržavamo, on ipak uvijek ostaje ishodni položaj za eventualna pomicanja, te ga zato moramo prije

početka samih mjerenja na stroju najpomnije odrediti. To izvodimo većinom s pomoću indukcije. Jedan od uzbudnih namota glavnih polova priključimo preko regulacionog otpornika na mrežu. S pomoću male sklopke za uzbudu možemo ga lako uklopiti i isklopiti. Time proizvodimo udarce indukcije u smjeru glavnih polova. Kad nosač četkica stoji točno okomito na taj smjer, priključeni osjetljivi voltmetar ne će pokazati nikakav otklon kod uklapanja ili isklapanja sklopke. Ako ipak dobijemo otklon, treba nosač tako dugo pomicati, dok ovaj ne iščezne. Eventualno prekoračenje neutralnog položaja pokazat će se na voltmetru za istosmjernu struju obratnim otklonom. Da se ne bismo dali smesti, promatrat ćemo samo udarac kod uklapanja. Kod isklapanja dobivamo i ovdje udarac suprotna smjera. Čim smo odredili neutralni položaj, fiksiramo ga urezivanjem značke na nosaču i protuznačke na kućištu. Pretpostavlja se kod čitavog mjerenja, da četkice budu dobro ubrušene, tako da praktički leže čitavom površinom na kolektoru. U protivnom slučaju možemo neutralni položaj konačno odrediti tek pošto su se četkice ubrusile. Definitivno ga trajno označimo ne odviše tankom strelicom. Pogonske položaje za desni i za lijevi smjer vrtnje, ukoliko odstupaju od neutralnog položaja, također trajno označimo daljnjim oznakama *D* i *L*. Dobre oznake, koje treba da budu i izvana dobro vidljive, prištedit će nam kod ispitivanja stroja na licu mjesta mnogo muke.

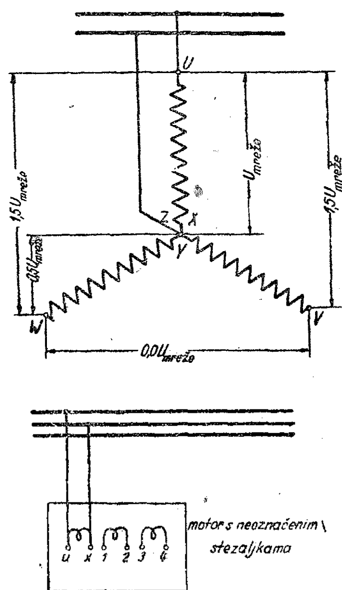
Kod drugog načina određivanja neutralnog položaja uzbudimo oprezno malom strujom samo armaturu i pomoćne polove. Rukom ćemo osjetiti na kraju osovine zakretni moment, koji postaje sve manji kod ispravna pomicanja četkica prema neutralnom položaju, te postane nula, kad taj položaj dosegnemo. Kako ovaj zakretni moment mijenja svoj smjer kod prolaza kroz neutralni položaj, bit će ovaj način mjerenja vrlo osjetljiv. Ova se metoda preporučuje u svim onim slučajevima, gdje bi uzbuda glavnih polova bila skopčana s poteškoćama ili bi bila, kao kod nekih specijalnih strojeva s nejednoliko namotanim rascijepljenim polovima, nemoguća.

Kod snimanja opterećenja, koje obično slijedi, možemo ispravan neutralni položaj četkica prepoznati još i po tome, što se karakteristike opterećenja za desni i za lijevi smjer vrtnje moraju potpuno poklapati. I tu treba isključiti izvor pogreške, koji predstavljaju četkice koje su ubrušene samo u jednom smjeru ili se nakreću.

Kod izmjeničnih kolektorskih strojeva priključimo namot statora, koji stoji okomito na neutralnu os armature, na izmjenični napon i promatramo otklon voltmetra za izmjeničnu struju, koji je priključen na četkice. Otklon nula odgovara ispravnom položaju nosača. Daljnje metode navedene su posebno kod tih strojeva.

Smisao istosmjernog namota armature možemo najjednostavnije okrenuti, ako zamijenimo pozitivnu i negativnu stezaljku armature. On zavisi o tome, da li je namot izveden kao križani ili kao nekrižani. Ako više stro-

jeva treba da budu međusobno izmjenljivi ili ako treba isporučiti i rezervne rotore, onda je potrebno kod ispitivanja bezuvjetno paziti, da li su rotori izvedeni s istovojnim namotom. Taj slučaj treba uzeti u obzir, jer se tokom serijske proizvodnje može dogoditi, da bude izrađen rotor drugog smjera obilaženja. Najbolje je da rotore ispitujemo samo u kućištu. Kad je smjer vrtnje kod svih strojeva isti, uz isti prostorni položaj pozitivnih četkica i pozitivnih polova, onda i namoti armatura međusobno odgovaraju.



Sl. 4. Određivanje ispravnih oznaka stezaljki *UX*, *VY*, *WZ* voltmetrom i jednofaznom uzbudom.

1. Galvanometrom odrediti početke i završetke faza, i proizvoljno označiti jednu fazu sa *UX*, ostale sa 1, 2, 3, 4.

2. *UX* jednofazno uzbuditi. *X* spojiti s po jednom stezaljkom ostalih faza, tako da napon između obje slobodne stezaljke bude nula, a između *U* i svake pojedine od slobodnih stezaljki 1,5 (napon priključen na *UX*).

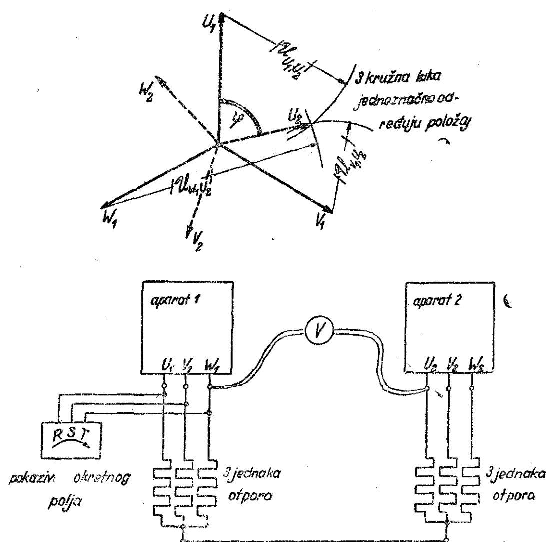
3. Slobodne stezaljke označiti sa *V*, *W*, i to tako, da priključak mreže *RST* na *UVW* dade traženi smjer vrtnje. Pripadni svršeci su *Y*, *Z*.

4. Spojiti u zvijezdu ili u trokut.

Namoti sinhronih i asinhronih strojeva za trofaznu struju većinom su izvedeni ispravno u pogledu osi i smjera, jer su pojedine faze jednako sastavljene. Tek rijetko će biti jedna faza obrnuto priključena. Pokazuje li uzbuđeni sinhroni stroj međusobno jednake linijske i jednake fazne napone, to je i spoj svitaka ispravan. Isto vrijedi i za asinhroni stroj, koji neopterećen priključimo na mrežu, pa pokazuje jednake napone prema zvjezdištu i uzima jednake struje u sve tri faze. U slučaju obrnuto priključene faze, nastat će znatna razlika u strujama. Ispitivanje ovih namota ograničuje se većinom samo na to, da ustanovimo ispravne oznake stezaljki. Normalno treba da odgovara priključku faza mreže *RST* na stezaljke stroja *UVW*, ako nije propisan određeni smjer vrtnje, desni smjer vrtnje stroja, gledano sa pogonske strane. Ako je pak smjer vrtnje određen, onda treba, osobito kod velikih motora i kod generatora, *UVW* odabrati tako, da redoslijed faza mreže *RST* odgovara tom smjeru vrtnje.

U slučaju da kod trofaznog motora s kliznim kolutima ili s kolektorom, ili da kod trofaznog zakretnog transformatora tri početka i tri svršetka faza uopće nisu označeni, ili su označeni krivo, možemo sistematskim ispitivanjem, prema podacima na sl. 4, brzo naći prave stezaljke *U*, *V*, *W* i *X*, *Y*, *Z*, i prema tome spojiti u zvijezdu ili u trokut, kako već želimo. Potreban je izmjenični napon i voltmetar.

Određivanje međusobnog položaja primarnog i sekundarnog namota predstavlja zadatak, koji se u ispitnim stanicama uvijek iznova pojavljuje kod ispitivanja zakretnih transformatora, neoznačenih transformatora zatvorene izvedbe i prije svega kod trofaznih kolektorskih motora i kod trofaznih uzbudnih strojeva. Ono je ishodna točka za daljnja ispitivanja. Najbolja i najpreglednija metoda osniva se na neposrednom mjerenju međusobnog faznog položaja napona inducirani u pojedinim namotima. U tu svrhu potreban je samo voltmetar s prikladnim mjernim područjima i još k tome za svaki namot, spojen u trokut ili s nepristupačnim zvjezdištem po jedan trofazni otpornik za dobivanje umjetne nul-točke. Jedan od namota, i to najbolje primarni namot, koji je u pogonu priključen na mrežu, priključimo na napon. Bolje je odabrati napon manji od nominalnoga, da bi u slučaju pogrešna spoja struje kratkog spoja bile manje, te

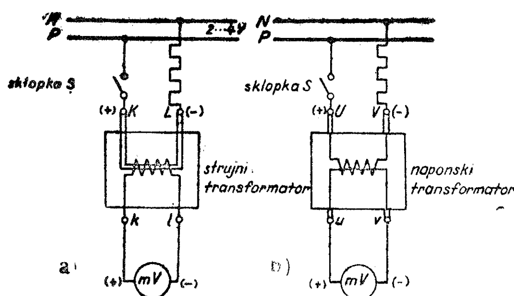


Sl. 5. Određivanje vektora napona uz upotrebu umjetnih nultočaka.
1. Eventualno određivanje redoslijeda faza pokazivalom okretnog polja.
2. Mjerenje zvijezde napona »1« (U_1, V_1, W_1).
3. Određivanje točke U_2 s pomoću napona između stezaljke U_2 i stezaljki U_1, V_1 i W_1.
4 Određivanje točaka V_2 i W_2.
5. Kontrola zvijezde »2« (U_2, V_2, W_2) mjerenjem faznih i linijskih napona na aparatu 2.

da bismo mjerenje mogli provesti uz što manju opasnost. Zatim ispitamo voltmetrom, nema li napona između zvjezdišta ili umjetnih nul-točaka. Ako smo unaprijed uklonili sve spojeve između primarne i sekundarne strane, ne smije ga biti. U slučaju da voltmetar ne daje otklon, spojimo nul-točke međusobno. Nakon toga sistematski mjerimo pojedine napone, linijske i fazne, te ih nanosimo na papir kao zvijezdu, odnosno poligon napona.

Položaj primarne zvijezde prema sekundarnoj proizlazi jednoznačno iz mjerenja napona, koja smo izveli među stezaljkama primarnih i sekundarnih namota. Promatranjem nacrtanih vektora napona vidimo odmah što treba poduzeti, da bismo ispunili postavljene zahtjeve u pogledu odgovarajućeg označivanja faza prema shemi spoja ili u pogledu zahtijevana međusobnog faznog položaja. Ovaj način ispitivanja opširno je razrađen kod pojedinih vrsta strojeva. Da bismo jednoznačno odredili pojedine točke sekundarne zvijezde, potrebno je po jedno mjerenje prema svim trim stezaljkama *U, V, W* primarnog namota (sl. 5).

Druga, često vrlo uspješna metoda, radi s uzbudom samo jedne faze. U tom slučaju imamo u stroju samo izmjenično polje. U svim svicima ili fazama sa srednjom, djelotvornom osi u smjeru uzbudnog svitka inducira se puni napon. U svim svicima, koji stoje točno okomito prema ovom smjeru, dobivamo napon nula. Napon ostalih svitaka kreće se između nule i maksimalne vrijednosti, napose napon u svicima zakrenutim za 60° ili za 120° iznosi točno ½ maksimalnog napona. To slijedi iz činjenice, da se inducirani naponi kod jednoosnog polja mijenjaju s kosinusom kuta zakreta. Želimo li na pr. u slučaju namota, koji se mogu međusobno zakretati, dakle kod zakretnog transformatora, postaviti sekundarni namot u isti položaj kao primarni, treba fazu *U-X* primarno priključiti na napon, i rotor tako dugo zakretati, dok napon faze *u-x* sekundarno ne dosegne maksimum. Da bismo isključili netočnost zbog položita maksimuma, mjerimo za kontrolu napone na fazama *v-y* i *w-z*, koji se moraju međusobno točno podudarati i pokazivati polovinu vrijednosti napona faze *u-x*. Ulančeni napon obiju posljednjih faza, dakle napon između v i w bit će nula, jer obje ove faze zajedno djeluju kao jedna jedina nadomjesna faza, kojoj je smjer okomit na fazu *u-x* (vidi i sl. 4).



Sl. 6. Određivanje ili kontrola ispravnih oznaka stezaljki kod strujnih (a) i naponskih (b) transformatora. Primarno priključiti na istosmjerni napon, tako da stezaljka *K*, odnosno *U* bude (+). Kod uklapanja pokazuje sekundarna stezaljka *k*, odnosno *u* (+)-potencijal.

Jednofazna uzbuda preporučuje se uvijek, kad imamo krivo spajanje, pa treba prije svega ispravno raspoznati pojedine faze kao takve. Ukupni spoj, koji smo na osnovu toga ispravili, kontroliramo tada najbolje trofaznom uzbudom.

Induktivno ispitivanje udarcima istosmjerne struje primjenjujemo kod izmjeničnih strojeva tek u pojedinačnim slučajevima. Upotrebljavamo ga,

da bismo ispitali ispravnost oznaka stezaljki kod strujnih i naponskih transformatora. Potrebne upute daje nam sl. 6.

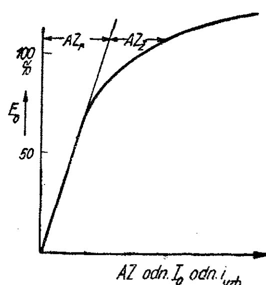
D. POKUS PRAZNOG HODA

Pokus praznog hoda pokazuje nam svojstva magnetskog kruga, gubitke, koji nastaju u praznom hodu, te mehaničko ponašanje stroja kod vrtnje. Izvodimo ga pri nominalnoj brzini vrtnje, nominalnoj frekvenciji i nominalnom naponu. Po mogućnosti ga protegnemo i na područje manjih i većih vrijednosti napona, kao i na povećanu brzinu vrtnje, koja je uvijek propisana iz mehaničkih razloga, a premašuje normalnu za 20 do 120%. Prema načinu izvođenja pokusa, razlikujemo motorski i generatorski postupak. Oba postupka daju iste rezultate.

Motorski postupak. Stroj, koji treba ispitati, priključimo na mrežu propisanog napona. On električki uzima iz mreže snagu, koja je uglavnom potrebna za pokrivanje gubitaka u željezu i gubitaka trenja. Struju magnetiziranja daje kod transformatora i svih vrsta indukcionih strojeva također mreža. Najbolje je istosmjerne strojeve uzbuđivati nezavisno, kako bismo i kod strojeva sa samouzbudom odmah strogo odijelili struju armature od uzbudne struje. Mjerimo mrežni napon U_0, dovedenu djelatnu snagu N_0, struju praznog hoda, koju stroj uzima I_0, uzbudnu struju i_0, te u nekom slučaju faktor snage cos φ_0. Ovaj posljednji određujemo većinom računski iz ostalih rezultata mjerenja. Da bismo dobili karakteristike praznog hoda, ponavljamo mjerenje uz promijenjen mrežni napon, dok brzinu vrtnje držimo konstantnom. Napon možemo većinom sniziti do trećine nominalne vrijednosti, a da stroj još ne postaje nestaliban. Daljnje sniženje uzrokuje gdjekada poteškoće, te većinom ne pokazuje ništa novo. Povećanje napona iznad nominalne vrijednosti trebalo bi uvijek provesti, da bismo upoznali ponašanje stroja u pogledu gubitaka u željezu i potrebne struje magnetiziranja kod većeg magnetskog toka.

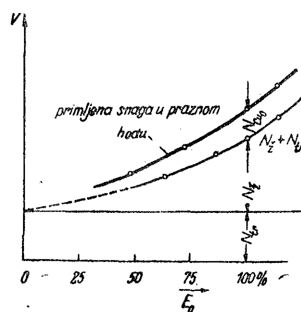
Najvažnija je **karakteristika praznog hoda** t. zv. krivulja zasićenja, koju nazivamo još i krivuljom magnetiziranja ili krivuljom praznog hoda. Ona prikazuje zavisnost struje magnetiziranja o EMS E. Ovu posljednju vrijednost uzimamo gotovo uvijek jednakom naponu stezaljki u praznom hodu U_0, jer male razlike, koje nastaju zbog pada napona na unutarnjim djelatnim ili induktivnim otporima zbog struje praznog hoda, možemo zanemariti. Jedino kod istosmjernih strojeva odbijamo cca 2 V zbog pada napona na četkicama. Struja magnetiziranja je kod istosmjernih strojeva jednaka uzbudnoj struji, dok je kod indukcionih strojeva i transformatora moramo odrediti računski kao produkt struje praznog hoda i sinusa faznog kuta u praznom hodu. Ako je cos φ u praznom hodu između 0,01 i 0,15, možemo uzeti sinus jednak jedinici i time struju magnetiziranja jednakom

izmjerenoj struji praznog hoda I_0, a da pogreška ne bude veća od 1%. Izgled krivulje zasićenja karakterističan je za sve strojeve sa zračnim rasporom. Kad uzbudna struja raste, povećava se inducirani napon E_0 isprva linearno, a zatim raste polakše, te se praktički približava graničnoj vrijednosti, koju ni kod vrlo velikih uzbudnih struja više ne prekoračuje. U tom stanju stroj je potpuno zasićen. Kako s jedne strane inducirani napon, dakle i magnetski tok treba da bude što veći, da bismo potpuno iskoristili aktivno željezo, dok s druge strane treba izbjegavati preveliki utrošak energije u uzbudnom krugu, poznavanje krivulje zasićenja osobito je važno za prosuđivanje tih odnosa, napose kod novih izvedaba. U praksi određujemo zato mjerenjem kod svih strojeva najmanje dvije do tri, a većinom još i više točaka. Na sl. 7. prikazana je krivulja zasićenja uobičajena oblika.



Sl. 7. Karakteristika zasićenja $AZ_{zr} = AZ$ za magnetiziranje zračnog raspora $AZ_{ž} = AZ$ za magnetiziranje željeza

Uži gubici praznog hoda. Za daljnje prosuđivanje stroja potrebno je točno poznavati uže gubitke praznog hoda, dakle gubitke trenja i gubitke u željezu neopterećena stroja. Ove dobivamo, ako od snage N_0, koju stroj uzima u praznom hodu iz mreže, odbijemo gubitke u bakru N_{Cu_0} koji nastaju u namotu zbog struje praznog hoda. Kako ovi posljednji većinom predstavljaju tek vrlo mali dio, to je često dopušteno uzeti uže gubitke praznog hoda jednake gubicima praznog hoda. To osobito vrijedi kod istosmjernih strojeva i kod transformatora. Drugačije je kod polaganih asinhronih motora, kao i kod kranskih motora, jer tamo struja praznog hoda može iznositi do 80% struje punog opterećenja, zbog čega nastaju gubici praznog hoda u bakru u visini od 64% gubitaka kod nominalnog opterećenja. Zanemarimo li gubitke praznog hoda u bakru, uzeli smo veću sigurnost u pogledu užih gubitaka praznog hoda $N_ž + N_{tr}$.

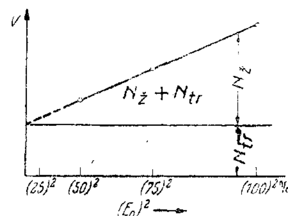


Sl. 8. Grafičko rastavljanje gubitaka praznog hoda asinhronog motora na gubitke praznog hoda u bakru N_{Cu_0}, gubitke u željezu $N_ž$ i gubitke trenja N_{tr}.

Uže gubitke praznog hoda nanosimo kao krivulju gubitaka u zavisnosti o naponu. Krivulja teče parabolički, i odsijeca na ordinati za napon nula iznos gubitaka trenja. Budući da je direktno snimanje, kao što je gore spomenuto, moguće samo do cca $1/3$ nominalnog napona, to moramo krivulju gubitaka od oka produžiti prema dolje na odgovarajući način. Da bismo kod toga smanjili nesigurnost, preporučuje se nanijeti krivulju još i u zavisnosti o vrijednosti kvadrata napona. Zbog go-

tovo potpuno kvadratične zavisnosti gubitaka u željezu o naponu, ležat će sada mjerene točke na pravcu, koji možemo lako i s velikom sigurnošću produžiti do nule. Sl. 8 prikazuje krivulje gubitaka asinhronog stroja s razmjerno velikim gubicima praznog hoda u bakru, a sl. 9 razdvajanje gubitaka.

Generatorski postupak. Kod ovog postupka spojimo ispitivani stroj s baždarenim, nezavisno uzbuđenim pogonskim motorom, te ga s pomoću ovoga potjeramo na nominalnu brzinu vrtnje. Zatim ga uzbudimo i to po mogućnosti nezavisno. Gubici u željezu i gubici trenja pokrivaju se mehaničkim putem preko osovine. Gubici u bakru nastaju samo u uzbudnom namotu. Pokriva ih uzbudna mreža i oni ne smetaju kod mjerenja. Krivulju zasićenja snimamo tako, da pomičemo uzbudni regulator i pritom pazimo na konstantnu brzinu vrtnje. EMS E dobivamo mjerenjem posve točno, jer u namotima, gdje se inducira, ne teče struja. Određivanje užih gubitaka praznog hoda $N_ž + N_{tr}$ je međutim zamršenije nego kod motorskog postupka. Izračunavamo ih iz snage, koju uzima pogonski motor, kad odbijemo njegove gubitke. U praksi je gdjekadna dovoljno mjeriti snagu, koju on uzima i od toga odbiti samo snagu u praznom hodu motora, kad radi sam za sebe. To daje upotrebljive rezultate, ako je pogonski motor razmjerno velik. No kod točnijih mjerenja treba uzeti u obzir sve gubitke u pogonskom motoru. Prikladan postupak prikazan je na str. 232. Velika je prednost generatorskog postupka, što nije potrebna mreža promjenljiva napona, te što krivulju zasićenja i gubitke trenja možemo odrediti brzo i besprikorno. Kod sinhronih strojeva ga često primjenjujemo, kod istosmjernih isto toliko, koliko i motorski postupak. Ne može se, naravno, primijeniti kod svih onih strojeva, koji nemaju vlastita uzbudnog kruga.



Sl. 9. Grafičko razdvajanje gubitaka u željezu i gubitaka trenja prikazivanjem gubitaka u praznom hodu u zavisnosti o kvadratu napona.

Pokus vitlanja. Pošto su dovršena prava mjerenja praznog hoda, tjeramo stroj povećanom brzinom vrtnje. To napreže stroj u mehaničkom pogledu. Ovaj pokus je potreban, da bismo ustanovili, da li je stroj dorastao povećanim brzinama vrtnje, do kojih gdjekada dolazi kasnije u pogonu To će biti slučaj na pr. kod generatora nakon rasterećenja, prije no što regulator brzine vrtnje snizi snagu pogonskog stroja ili kod serijskih motora kod rasterećenja, ili kod motora s prevelikim provlačnim teretom. Povećanje brzine vrtnje zavisi uglavnom o vrsti upotrebe, a ne o vrsti samog stroja. Kod velikih strojeva izvodimo pokus gdjekada u t. zv. jamama za vitlanje, da bismo isključili opasnost za okolinu. Ako povećana brzina vrtnje leži samo 20 do 50% iznad normalne, često izvodimo istovremeno ispitivanje s povećanim naponom, kao što je spomenuto na str. 6.

Ispitivanje s povećanom brzinom vrtnje traje 2 minute. Ono se posebno unosi u ispitni zapisnik.

Mehanički hod. Za vrijeme praznog hoda ispitujemo i dobar mehanički hod stroja. Šumovi pak često jako zavise o opterećenju, te ih zato ne možemo u praznom hodu konačno ocijeniti.

Smetnje u ležajima opažamo po prevelikom zagrijavanju — kad ovo ustanovimo, treba stroj odmah zaustaviti — i po struganju, koje čujemo osobito kod defektnih kugličnih i valjkastih ležaja. Slušanjem s pomoću prislonjena štapića možemo lako pronaći defektni ležaj.

Pregledom ćemo se osvjedočiti, da li je zračnost osovine u aksijalnom smjeru ispravna, ne struže li rotor s jedne strane zbog magnetskih sila, ne uvlači li ventilator ulje i t. d.

Nemiran hod stroja ustanovit ćemo tako, da ga dotičemo rukom, koja je vrlo osjetljiva. Objektivne rezultate dobivamo s pomoću sprava navedenih u III. dijelu. Da bismo mogli ustanoviti nije li razlog u magnetskim nesimetrijama, ispitujemo stroj pod naponom i bez napona. Ako stroj loše radi samo kad je uzbuđen, treba se pobrinuti, da to ispravimo točnim udešavanjem zračnog raspora. Ako pak stroj, postavljen dobro priležećim nogama na ravnu ploču, pošto smo ga odvojili od mreže, još uvijek nemirno radi, treba ga dinamički balansirati. U posebnim slučajevima ispitujemo stroj slobodno zavješen, da bismo isključili kao razlog mogućnost, da je stroj loše postavljen. U tu svrhu ga potjeramo, dok stoji na zemlji, a zatim ga dizalom podignemo uvis, te odvojimo od mreže. Ako se sada, za vrijeme zaustavljanja, ne pokažu smetnje u mirnu hodu, onda je balansiranje besprijekorno. Treba se čuvati uklapanja stroja u tom položaju. Potezni moment zakreće stator u istoj mjeri kao i rotor, pa može izbaciti stroj iz kuke dizala.

Ponešto nemirnu hodu, koji nastupa tek izvan područja brzine vrtnje, u kojem stroj treba da radi, obično ne prigovaramo.

Kod ispitivanja agregata, koji se sastoje od više strojeva, a kod kojih možemo u početku često ustanoviti nemiran hod, dovodi do cilja jedino razdvajanje svih pojedinačnih strojeva, i zasebno ispitivanje.

Uzevši u obzir sve rezultate, koje daje pokus praznog hoda, razumljivo je, da bi ga trebalo izvoditi na svakom stroju, i da on predstavlja dovoljno ispitivanje, napose kod ispitivanja čitavog niza jednakih strojeva, ukoliko usporedba s mjerenjima na nekoliko potpuno ispitanih strojeva pokazuje praktičko podudaranje. U ispitni zapisnik treba u takvim slučajevima unijeti odgovarajuće upozorenje.

E. POKUS OPTEREĆENJA

Pokuse opterećenja izvodimo, da bismo stroj ispitali pod uvjetima jednakim ili bar što sličnijim onima, uz koje će stroj kasnije raditi. Ispitivanje se proteže prije svega na istraživanje opteretivosti same po sebi, onako kako je određena električkim svojstvima; zatim na karakteristično ponašanje kod promjenljiva opterećenja u stacionarnom pogonu, a gdjekada i na stabilnost, osobito kod mehaničkog ili električkog paralelnog rada s drugim strojevima. Pokus trajna opterećenja izvodimo, da bismo odredili zagrijavanje namota, aktivnog željeza, kolektora, kliznih koluta, ležaja i drugih dijelova stroja kod nominalna opterećenja.

Karakteristike opterećenja. Da bismo snimili karakteristike opterećenja, ispitujemo stroj opterećujući ga na jedan od načina, opisanih u I. dijelu pod K. Kao osnovne karakteristike vrijede krivulje, koje prikazuju zavisnost napona stezaljki o opterećenju kod generatora, odnosno brzine vrtnje o opterećenju kod motora. K tome pridolaze kod strojeva s posebnim uzbudnim krugom još i karakteristike regulacije, koje prikazuju međusobnu zavisnost uzbudne struje i opterećenja, pri čemu držimo sada konstantnima napon, odnosno brzinu vrtnje. Karakteristike opterećenja nadopunjujemo krivuljom za korisnost, a u danom slučaju i za faktor snage. Kod sinhronih generatora i motora dobivamo čitavo jato krivulja regulacije, pri čemu svakoj pojedinoj pripada bilo određena vrijednost faktora snage, bilo djelatnog opterećenja. Nadalje određujemo kod svih motora s regulacijom brzine vrtnje karakteristike za različite brzine, pri čemu treba uzeti u obzir bar najmanju, srednju i najveću brzinu vrtnje.

Ispitivanja vršimo kod djelomičnog opterećenja, punog opterećenja i preopterećenja. Za ovo posljednje određuju propisi (REM) za pojedine vrste strojeva minimalnu vrijednost, koju treba postići i kontrolirati. U praksi često prekoračujemo ove zahtjeve i tražimo preopterećenja od 100 do 200% i više. Tamo, gdje nije moguće neposredno mjeriti opteretivost, pomažemo se računskim metodama, koje se temelje na rezultatima mjerenja. Prednost ima neposredno mjerenje.

Pokus zagrijavanja (pokus trajnog rada). Da stroj bude siguran u pogonu, zagrijavanje mu mora biti takvo, da u kasnijoj upotrebi nipošto ne ugrožava osobito izolaciju namota. Kao obvezatna podloga za dopuštena povišenja temperature vrijede u većini zemalja određeni propisi; ovi propisuju za pojedine namote i susjedno željezo granične temperature, koje zavise o vrsti izolacije, podijeljene u različite razrede.

Poznavanje stvarnog ugrijanja osobito je važno s dva razloga. Prije svega treba dokazati, da su uvjeti, uz koje je stroj naručen, ispunjeni, dakle

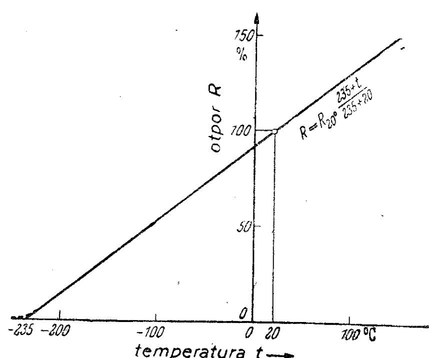
da nije prekoračeno garantirano povišenje temperature. Zatim nam treba iskustvo, za koliko možemo predviđenu snagu još povećati, da bismo dosegli dopušteno granično ugrijanje. Ova povećana snaga zove se termička snaga stroja. Uvjetovana je termičkim odnosima, dakle najviše načinom hlađenja, te je gdjekada možemo još povećati, ako ovaj poboljšamo. Ne smijemo je zamijeniti s prekretnom ili maksimalnom snagom, koja je određena fizikalnim svojstvima, bez obzira na ugrijanja, koja se kod toga pojavljuju, te je važna za kratkotrajnu ili udarnu preopteretivost. Kod srednjih i velikih strojeva leži termička granična snaga redovito daleko ispod fizikalne maksimalne snage.

Ugrijanje određujemo pokusom trajnog rada opterećena stroja. U praksi ga nazivamo pokusom zagrijavanja. Pokus zagrijavanja izvodimo po mogućnosti pri nominalnom naponu, nominalnoj struji i nominalnoj brzini vrtnje. Kod strojeva s regulacijom brzine dobro je izvesti pokus kod najmanje, i još jedan pokus kod najveće brzine vrtnje. Da bismo dosegli zaista stalnu temperaturu, produžujemo pokus satima, većinom za 4 do 8 sati. Treba spomenuti, da otvoreni, dobro ventilirani strojevi dosegnu konačno ugrijanje već nakon kratkog vremena, a zatvoreni strojevi tek nakon mnogo sati. Strojeve za isprekidani pogon kod točnog ispitivanja i tjeramo u isprekidanom pogonu. Kontrolerom poslužujemo odgovarajuće sklopnike (kontaktore), koji služe za uklapanje, isklapanje i, ako treba, za kočenje. U praksi se gdjekada zadovoljavamo nadomjesnim skraćenim pogonom, kod kojega stroj opterećujemo punom strujom samo 10 do 60 minuta. Ovaj se postupak preporučuje jedino, kad je nadomjesno vrijeme točno poznato, te kad ispitujemo više strojeva iste izvedbe.

Kod velikih jedinica nije uvijek moguće potpuno opteretiti stroj. U tom slučaju izvodimo pokus s punom strujom uz smanjeni napon. Temperature namota dosežu kod otvorena stroja gotovo istu vrijednost, kao kod pravog pogona. Ugrijanje željeza je zbog jako smanjenih gubitaka u željezu naravno premalo. Kod vrlo velikih strojeva, osobito kod velikih sinhronih i istosmjernih generatora, izvodimo jedan pokus u čistom kratkom spoju s nominalnom strujom, i drugi pokus u čistom praznom hodu s nominalnim naponom. Nadtemperature, koje smo kod toga dobili, zbrojimo i to smatramo stvarnim povišenjem temperature. Ma da ovakva superpozicija nije sasvim ispravna, daje nam ipak u praksi vrlo upotrebljive rezultate, koji leže samo nekoliko stupanja iznad pravih vrijednosti. Da bismo skratili pokus zagrijavanja, radimo često prvog pol sata ili čitav sat s povećanom jakosti struje uz odgovarajući brži porast temperature. Koje vrijednosti treba kod toga odabrati, može odlučiti samo iskustvo. Treba li na istom stroju izvesti dva pokusa, na pr. kod dvije različite brzine vrtnje, to je, s obzirom na uštedu vremena, poželjno, a većinom i prihvatljivo, da drugi

skraćeni pokus neposredno nadovežemo na prvi. Pretpostavlja se međutim, da kod toga bude praktički jednako ugrijanje u oba slučaja.

Mjerenje ugrijanja. Temperature na pristupačnim dijelovima stroja mjerimo za vrijeme rada tekućinskim termometrima sa živom ili alkoholom, termoelementima ili električkim otporničkim termometrima od niklja ili platine. Ove sprave, njihova primjena i način rada obrađeni su opširno u III. dijelu pod B. Srednje ugrijanje namota možemo odrediti mjerenjem toplih otpora namota istom pošto je stroj zaustavljen. Između otpora i temperature imamo kod čistih metala jednostavnu vezu:



Sl. 10. Otpor bakra u zavisnosti o temperaturi

$$\frac{R_{toplo}}{R_{hladno}} = \frac{T + t_{toplo}}{T + t_{hladno}},$$

gdje je T vrijednost zavisna o metalu, za bakar jednaka 235, za aluminij 245. Zavisnost otpora prikazana je na sl. 10. Kod temperature $-T^0$, otpor praktički potpuno nestaje.

Iz mjerenja toplog otpora namota možemo dakle unatrag zaključiti na srednju temperaturu namota. Za nadtemperaturu, koja nas prije svega zanima, dobivamo za namote od bakra slijedeću relaciju, u kojoj je uzeto u obzir i eventualno povišenje temperature u prostoriji:

$$t_{nad} = \Delta r^0/_0 \cdot \frac{235 + t_{hladno}}{100} - (t_{pr\,tpl} - t_{hladno}),$$

gdje znači:

$$\Delta r^0/_0 = \frac{(R_{toplo} - R_{hladno})}{R_{toplo}} \cdot 100,$$

t_{hladno} = temperatura namota kod hladnog mjerenja,

$t_{pr\,tpl}$ = temperatura prostorije kod toplog mjerenja.

To vrijedi tako dugo, dok rashladni zrak uzimamo iz prostorije. Kod strane ventilacije treba mjesto $t_{pr\,tpl}$ uvrstiti temperaturu rashladnog zraka na ulazu, a kod hlađenja vodom ulaznu temperaturu vode, jer uvijek određujemo nadtemperaturu s obzirom na temperaturu rashladnog sredstva.

Praktička izvedba pokusa trajnog rada. Prije početka pokusa opremimo stroj na različitim mjestima termometrima ili termoelementima. Kod otvorene izvedbe pričvrstimo jedan od njih što bolje na paket aktivnog željeza. Prikladni su zato ventilacioni kanali, koji su obično pristupačni.

Dodirno mjesto prelijepimo pustom, da ga zaštitimo od pristupa rashladnog zraka. Kod zatvorenih strojeva izvadimo ušicu za dizanje ili koji drugi prikladan vijak i na njegovo mjesto stavimo termometar. Zatiskivanjem staniola osiguramo dobar toplinski kontakt. I ovdje izoliramo također slojem pusta od vanjskog zraka. Daljnje sprave stavimo u glave mirnih namota, gdje ih utisnemo što je dublje moguće. Kod zatvorenih strojeva možemo često unutra smjestiti termoelement, a dovode izvesti kroz rupe u ležajnom štitu, predviđene za mjerenje raspora. U udaljenosti od 1 m i u istoj visini sa strojem mjerimo temperaturu prostorije. Kod upotrebe posebnog rashladnog sredstva ili kod postavljenih priključnika za ulaz i za izlaz zraka, mjerimo s pomoću posebno smještenih termometara još i temperaturu rashladnog sredstva na ulazu i na izlazu, t. j. usisanog i izbačenog zraka.

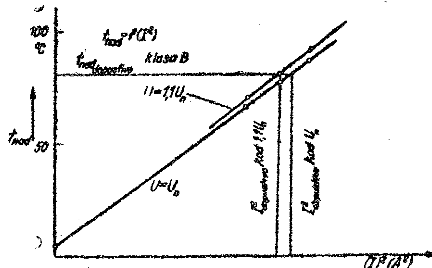
Sve sprave očitavamo u početku pokusa i u pravilnim razmacima od cca $^1/_4$ do $^1/_2$ sata. Ove vrijednosti unosimo u zapisnik uz točne podatke o vremenu, električkim veličinama i brzini vrtnje. Prirast temperature dijelova, koji se zagrijavaju, dakle osobito željeza i namota, teče isprva linearno s vremenom, zatim se smanjuje, i onda potpuno prestaje, kad smo dosegli konačnu temperaturu, kod koje stroj sve nastale gubitke predaje okolini.

Zbog različito velikih gubitaka i različite mogućnosti hlađenja željeza i namota, doseći će oni, pošto im se porast temperature već upočetku razlikovao, svoje konačno ugrijanje nakon različitih vremenskih razmaka. Pokus zagrijavanja možemo smatrati završenim istom onda, kad se nadtemperatura prema temperaturi prostorije uopće više ne mijenja ili se mijenja tek vrlo polagano, cca 1° za pola sata. To vidimo odmah, ako usporedimo zadnja očitanja. Prirast temperature uzbudnih namota kod istosmjernih i sinhronih strojeva, gdje moramo struju držati konstantnom, možemo pouzdano pratiti po povećanju uzbudnog napona, koji se mijenja u istoj mjeri kao što raste otpor namota. Voltmetar mora naravno biti priključen iza otpornika za regulaciju uzbude. Kod istosmjernih motora polje obično više ne reguliramo naknadno. Tu je uzbudna struja, koja opada uz konstantni napon na uzbudnom namotu, mjera za ugrijanje, koje raste. Ako struja i napon ostaju konstantni, onda je uzbudni namot dosegao konačno stanje. Treba uostalom napomenuti, da je otpor uzbudnog namota jedini, koji možemo iz omjera napona i struje za vrijeme pokusa zagrijavanja trajno nadzirati. Preporučuje se zabilježiti u zapisnik povišenje temperature, koje smo odavle izračunali uz ono, koje dobivamo nakon zaustavljanja mjerenjem otpora s pomoću mosta. Kod toga nema pogrješke zbog ohlađivanja u vremenu od isklapanja stroja do mjerenja.

Pošto je dosegao krajnju temperaturu, isključimo stroj i odmah pošto smo uklonili sve spojeve, koji ometaju mjerenje, izmjerimo otpore. Kod

toga primjenjujemo istu metodu mjerenja, uz upotrebu istih otpornika odnosno jakosti mjerne struje, kao što smo ih upotrebili kod hladnog mjerenja otpora. Po mogućnosti istovremeno izvodimo i ona mjerenja termometrom, koja za vrijeme rada nisu bila izvediva, na namotu i željezu rotora, kliznim kolutima ili kolektoru. I ostale termometre očitamo još jedamput, jer se gdjekada iza nekoliko minuta vrijednost još nešto poveća. Razrada iz povećanja otpora daje redovito veće temperature od termometarskog mjerenja, koje možemo provesti samo s vanjske strane izolacije i na dobro hlađenim glavama namota. Razlika iznosi 5 do 10°, no može ispasti još i veća. Razlog je tome, što mjerenje otpora daje srednju vrijednost za čitav namot, dok mjerenje termometrom pokazuje samo lokalnu vrijednost. Temperature u unutrašnjosti, osobito u sredini pojedinih paketa željeza mogu biti još znatno veće.

Kod vrlo točnih mjerenja uzimamo u obzir i ohlađivanje namota za vrijeme mjerenja. Ovo činimo na taj način, da izvedemo više mjerenja otpora uz točno određivanje vremena. Na taj način dobivamo vremensku krivulju ohlađivanja, koju produžujemo unatrag do časa završetka pokusa zagrijavanja i tako dobijemo pravu vrijednost temperature. Ova metoda mjerenja zahtijeva mnogo vremena, te je u praksi vrlo malo primjenjujemo; radije pristajemo na malu pogrješku, koja uvijek nastaje zbog vremena, koje proteče od isljučivanja stroja do izvođenja mjerenja otpora. Da bi ova bila što manja, mjerimo prvo onaj namot, za koji predmnijevamo, da se najjače ugrijava, a zatim grupu ostalih manje naprezanih svitaka. Strojeve s velikim vlastitim ili spojkom priključenim zamašnim momentom moramo kočiti, da bismo skratili zaustavljanje. U svakom slučaju treba odmah obustaviti ventilaciju.



Sl. 11. Određivanje termički dopustive granične snage kod nominalnog napona, te kod napona povećanog za 10%

Granična snaga. Kod novih izvedaba strojeva često izvodimo daljnje pokuse zagrijavanja, koje dijelom neposredno nadovezujemo na prvi. Kod ovih pokusa povećamo snagu na vrijednost, za koju nam se čini, da će, prema rezultatu prvoga pokusa, dovesti do dopuštenog ugrijanja. Ako je na pr. u namotu dopušteno povišenje temperature od 60°, a prvi je pokus dao u najjače ugrijanom namotu nadtemperaturu od svega 48°, izvodit ćemo drugi pokus s gubicima u namotu povećanima otprilike u omjeru 60 : 48. Struju treba zato povećati u omjeru korijena odavle, dakle na $\sqrt{60/48} =$ $= 1{,}11$-struku vrijednost. Da bismo dobili zaista pouzdanu vrijednost, izvodimo još i treći pokus sa strujom, koja će vjerojatno dovesti do malog

prekoračenja dopuštenog ugrijanja. Ugrijanje iz ova tri pokusa nanesemo u obliku krivulje, i to obično u zavisnosti o kvadratu struje (sl. 11). Ako su pokusi i mjerenja izvedeni bez pogrješke, dobit ćemo vrlo približno pravac, koji kod struje nula odsijeca na ordinati još određenu vrijednost. Ova temperatura uglavnom odgovara ugrijanju zbog gubitaka u željezu. Tamo, gdje krivulja siječe dopuštenu nadtemperaturu, očitat ćemo stvarno dopuštenu jakost struje, i time termičku graničnu snagu uz zadani napon. Daljnje povećanje snage moguće je sada jedino još povećanjem magnetskog toka, dakle povećanjem priključenog napona. Za napon, povećan u jednom ili u dva stepena, izvodimo nove pokuse, najbolje ponovno s različitim strujama. Odgovarajuće krivulje ugrijanja leže, zbog povećanih gubitaka u željezu, nešto iznad krivulje, koju smo prvi put dobili. Prema tome treba struju kod većih napona nešto smanjiti, no često možemo prilično dobiti na snazi. Da li smijemo i koliko smijemo stvarno povećati magnetski tok, možemo odlučiti istom onda, kada budemo uzeli u obzir promijenjene prilike zasićenja, eventualno smanjenje korisnosti i faktora snage, te obilatost uzbude.

Gdjekada pokazuju strojevi određenog tipa, koji je već prije bio ispitan s dobrim rezultatom, veća ugrijanja, no što bi smjela izaći prema tadašnjim mjerenjima. Pošto smo isključili eventualne grube griješke kod izvođenja pokusa, kao što to može biti preveliko opterećenje, trajni pogon, mjesto 1-satnog ili isprekidanog pogona i sl., treba svratiti pozornost na ventilaciju, napose na vođenje zraka. Najčešća je pogreška u izvedbi, da su ventilacioni zasloni odviše odmaknuti od ventilatora, ili ih čak uopće nema. Već neznatno primicanje od nekoliko milimetara može sniziti temperaturu za 5 do 10°, a gdjekada i više. Drugi su uzroci u nezgodnom izvođenju pokusa, na pr. u tome, da stroj za opterećenje puše topli zrak na ispitivani stroj, ili da ovaj ponovno uvlači vlastiti topli zrak. Razlozi, koje većinom ne možemo više ukloniti, to su na pr. odviše stisnuto motane glave namota, i kod zatvorenih strojeva statorski limovi, koji ne priležu sasvim uz unutarnju površinu kućišta.

Mjerenja ventilacije. Kod prvih izvedaba i kod većih strojeva mjerimo, osim temperature zraka na ulazu i na izlazu, još i količinu rashladnog zraka u minuti. To nadopunjujemo mjerenjem otpora, koji stroj pruža strujanju zraka.

Obično dovodimo stroju količinu zraka od 3,0 do 3,5 m³/min po kW gubitaka. To odgovara ugrijanju zraka za otprilike 18 do 15,5°. Potrebnu ukupnu količinu zraka možemo stoga procijeniti kao:

$$\text{potrebna količina zraka u m}^3\text{/min} = \text{snaga stroja u kW} \cdot \frac{100 - \text{korisnost u \%}}{\text{korisnost u \%}} \cdot 3{,}5.$$

Na pr.: količina rashladnog zraka stroja snage 350 kW sa korisnošću 4,5% iznosi: $350 \cdot \frac{(100-94,5)}{94,5} \cdot 3,0$ do $3,5 = 61$ do 71 m³/min.

Pad pritiska, dakle otpor strujanja zraka, leži većinom u granicama između 30 i 60 mm stupca vode.

Mjerenje količine zraka. Količinu zraka možemo izmjeriti direktnim ili indirektnim određivanjem brzine s pomoću anemometra ili mjerila brzine (str. 349). Izlazni priključnik za zrak podijelimo nitima na mnogo jednako velikih kvadrata, koje označimo na jednoj strani brojevima, a na drugoj slovima. Sada mjerimo brzinu zraka u sredini svakog kvadrata, pri čemu treba paziti na smjer strujanja zraka. Zrak, koji izlazi, označujemo sa +, a koji ulazi sa —. Pretežno će zrak, naravno, izlaziti. Iz pojedinih brzina izračunamo, pazeći na predznak, srednju brzinu za čitavi presjek, a odatle dobivamo količinu zraka, koja izlazi iz stroja:

količina zraka, koja izlazi u m³/min

= 60 · srednja brzina zraka u m/sek · izlazni presjek u m²

$$V = 60 \cdot v_{sr} \cdot S.$$

Ne treba zaboraviti, da veća ili manja dodatna količina zraka može izlaziti iz stroja i na druge otvore. Stanoviti oslonac o ispravnosti mjerenja daje nam gornja formula; bolji ćemo dobiti, ako usporedimo toplinu, koju odvodi zrak, s gubicima stroja. Ovi posljednji moraju doduše biti nešto veći zbog dodatnog predavanja topline zračenjem i vođenjem. Uz povećanje temperature rashladnog zraka $t_{izl} - t_{ul}$ dobivamo odvedenu toplinu u kilovatima:

snaga, koju odvodi rashladni zrak u kW =

$$(t_{izl} - t_{ul}) \cdot \frac{\text{količina rashladnog zraka u m}^3\text{/min}}{54\,5}.$$

To vrijedi uz normalne uvjete pritiska zraka od 760 mm stupca žive i cca 20° temperature prostorije.

Upotpunimo to još formulama za ulje i vodu kao rashladno sredstvo:

snaga, koju odvodi ulje u kW $= (t_{iz} - t_{ul}) \cdot$ količina ulja u l/sek · 1,7,

snaga, koju odvodi voda u kW $= (t_{izl} - t_{ul}) \cdot$ količina vode u l/sek · 4,2.

Mjerenje otpora strujanja zraka i snage, potrebne za ventilator. Otpor strujanja zraka u stroju određujemo mjerenjem statičkog pritiska zraka na mjestu ulaza i izlaza zraka, pri čemu je razlika obaju ovih pritisaka jednaka traženoj vrijednosti. Ventilator se ne smije nalaziti između oba mjesta mjerenja, zbog čega su besprijekorna mjerenja provediva samo kod strojeva sa stranom ventilacijom. Otpor strujanja zraka navodimo u mm stupca vode.

Snaga potrebna za ventilator zavisi o ukupnom pritisku, koji treba svladati, a koji se sastoji od statičkog protupritiska u stroju, dakle otpora strujanja zraka, i dinamičkog pritiska zraka, koji se giba. K tome pridolazi gdjekada još i otpor hladnjaka ili filtara, kao i dugačkih ventilacionih kanala. Dinamički pritisak iznosi:

$$p_{din} = v_{zr}^2 \cdot \gamma/2g \text{ u mm stupca vode, uz } v_{zr} = \text{brzina zraka u m/sek,}$$
$$= v_{zr}^2/16 \qquad \gamma = 1{,}23 \text{ kg/m}^3,$$
$$g = 9{,}81 \text{ m/sek}^2.$$

Dinamički pritisak mijenja se dakle s kvadratom brzine zraka, zakon po kojemu se ravna i otpor strujanja zraka u stroju. Označimo li sa p_{stat} otpor strujanja zraka, iznosit će snaga, potrebna za ventilator:

$$\text{snaga, potrebna za ventilator u kW} = \frac{\text{količina zraka u m}^3\text{/min} \cdot (p_{stat} + p_{din})}{6120 \cdot \text{korisnost ventilatora}}.$$

Korisnost ventilatora leži po prilici između 0,40 i 0,60.

Šum. Šum u električnim strojevima sastoji se od šuma ventilacije, magnetskih i mehaničkih šumova, koji dospijevaju u prostoriju neposredno kao zvuk prenošen zrakom ili posredno kao zvuk prenošen tijelom.

Kao glavna frekvencija u šumu ventilacije ističe se frekvencija rotorskih utora i u manjoj mjeri frekvencija ventilatorskih krila.

Magnetske sile pulziraju normalno frekvencijom od 100 Hz i stoga uzrokuju titraje ove frekvencije, zajedno s njihovim nadtonovima. Usto možemo izrazito čuti frekvenciju utora.

I viši harmonički valovi magnetskog polja mogu također prouzročiti jak šum.

Obje vrste šuma možemo razdvojiti promatranjem uzbuđena i neuzbuđena stroja.

Izvor mehaničkih šumova mogu biti uglavnom četkice kod kolektorskih strojeva i kuglični ležaji.

U ukupnom šumu stroja nalazi se, općenito, spektar mnogih pojedinačnih titranja različitih frekvencija.

Ispitivanje se proteže prije svega na određivanje jakosti zvuka u fonima u određenoj udaljenosti od stroja i na ispitivanje parcijalnih tonova, dakle spektra, jer na taj način možemo odrediti glavna titranja po jakosti i frekvenciji, i zatim odrediti im uzrok. Potrebni su aparati opisani ukratko na str. 346.

F. POKUS KRATKOG SPOJA

Pošto je dovršen pokus zagrijavanja, ispitujemo obično stroj u kratkom spoju. Ovo ispitivanje izvodimo radije na zagrijanu stroju, a osim toga preostaje nam za ovo mjerenje, koje ne traje odviše dugo, većinom još dovoljno vremena. Nema, naravno, zapreka, da uzmemo drugi redoslijed. Pokus izvodimo kod vrtnje ili kod mirovanja. Strojeve s posebnom uzbudom ispitujemo kod vrtnje, a ostale, dakle u prvom redu asinhrone strojeve, kod mirovanja ili kod vrlo male brzine. Sinhroni strojevi, koji kreću sami, rade za vrijeme zaleta kao asinhroni motori, a tek nakon upadanja u korak kao sinhroni strojevi. Ispitujemo ih kod zaleta i kod rada. Pokusom kratkog spoja mjerimo vrijednosti udarne i trajne struje kratkog spoja, gubitaka kratkog spoja, u kojima su sadržani dodatni gubici, zakretnih momenata u kratkom spoju, a također ispitujemo i mehaničku otpornost namota i kućišta prema kratkom spoju. Nadalje određujemo iz ovih rezultata čitav niz karakterističnih veličina. Kod istosmjernih strojeva određujemo u kratkom spoju uz otvoren uzbudni krug veličinu samouzbudene struje, te odabiramo eventualne protumjere. Rezultate prikazujemo u obliku karakteristika kratkog spoja.

Osnovna **karakteristika kratkog spoja** prikazuje struju kratkog spoja u zavisnosti o uzbudnoj struji kod strojeva s posebnim uzbudnim krugom, a u zavisnosti o priključenom naponu mreže kod ostalih strojeva. Ova karakteristika većinom je pravac. Istom kod većih struja, znatno iznad nominalne vrijednosti, pokazuje se zakrivljenost, i to zbog toga, što počinje zasićenje putova rasipa. Iz ove karakteristike dobivamo karakteristične veličine, kao kratkospojni napon, kratkospojnu reaktanciju, AZ kratkog spoja i druge. Dodatne karakteristike su one, koje prikazuju ostale mjerene vrijednosti, dakle gubitke kratkog spoja, faktor snage i zakretni moment u zavisnosti o struji ili naponu.

Zakretni moment u kratkom spoju. Kod svih motora sa samozaletom, među koje danas spada i većina sinhronih motora, treba mjerenjem odrediti potezni moment. Samo kod asinhronih motora s kliznim kolutima i kod normalnih istosmjernih motora s pokretačem odustajemo od ovog mjerenja, ako nisu propisani abnormalno veliki potezni momenti. Kod svih ostalih strojeva, dakle asinhronih motora s kaveznim rotorom, kod sinhronih motora s posebnim kavezom za zalet, kod istosmjernih motora s opsegom regulacije daleko prema dolje, kod izmjeničnih kolektorskih motora i — kao iznimni slučaj — kod asinhronih regulatora klizanja, ispitujemo proizvedeni moment na mirnom stroju, ili počevši od mirovanja.

Pokus izvodimo uvijek sa smanjenim naponom, a rezultat preračunavamo na puni napon. Zakretni moment i primljenu snagu preračunavamo kvadratično, a primljenu struju linearno s naponom na njegovu nominalnu

vrijednost. Strojeve spojene u trokut često ispitujemo kod nominalnog napona spojene u zvijezdu. To odgovara magnetskom toku smanjenom u omjeru $1/\sqrt{3}$ Vrijednosti zakretnog momenta, snage i struje treba u tom slučaju preračunati na trokut množenjem sa 3. Stvarno su mjerene veličine kod nominalnog napona veće no što izlazi ovim preračunavanjima, i to zbog prije spomenutih pojava zasićenja u putovima rasipa. Najsigurnije vrijednosti daje dakle pokus izveden pri nominalnom naponu, no ovaj smijemo izvoditi na mirnom stroju jedino kod malih i srednjih strojeva. I izmjenične kolektorske strojeve možemo također ispitivati kod mirovanja, ali samo uz jako smanjeni napon, jer bi inače zbog napona kratkog spoja pod četkicama došlo do zažarivanja četkica i do nagaranja lamela.

Zakretni moment u kratkom spoju možemo mjeriti polugom ili torzionim štapom, koji su opisani u III. dijelu. Drugačijem izvođenju pokusa dajemo prednost onda, kad moment ne želimo mjeriti samo kod mirovanja, nego i kod malih motorskih brzina u normalnom smjeru vrtnje i u suprotnom smjeru. U tom slučaju spojimo s motorom istosmjerni stroj s regulacijom uzbude, kojemu možemo regulirati i dovedenu struju. Ovu uzimamo ili iz istosmjerne mreže preko otpornika, i to vrlo velikog, ili, još bolje, iz posebnog pretvaračkog agregata ispitne stanice u Leonardovu spoju. Udešavanjem struje armature ili uzbudne struje spojkom priključena pomoćnog stroja možemo brzinu vrtnje vrlo osjetljivo udesiti na nulu ili male vrijednosti u jednom ili drugom smjeru vrtnje. Kod upotrebe Leonardovog spoja preporučuje se, da se spojkom priključeni stroj jako uzbudi, a Leonardov dinamo tek slabo u jednom ili u drugom smislu, jer u tom slučaju možemo uz najmanje moguće struje armature dobiti traženi protumoment. Zakretni moment određujemo računsko-grafički iz vrijednosti struje armature i uzbudne struje kočnog stroja metodom opisanom u II. dijelu pod D, ili još bolje na temelju jednom izrađenih tablica baždarenja, u kojima je prikazan zakretni moment u zavisnosti o struji armature, i to zasebno za pojedine vrijednosti uzbudne struje. Ako je pomoćni stroj dinamo-vaga, onda važemo zakretni moment; ako je spojen preko torzionog štapa, onda ga očitamo iz njegova zakreta. Osjetljive kolektorske strojeve, a i asinhrone motore, kod kojih moment mirovanja jako zavisi o položaju rotora, kao i specijalne istosmjerne strojeve, kod kojih treba točno odrediti najnižu karakteristiku brzine vrtnje, volimo ispitivati ovom metodom, nazvanom »metodom protustruje«.

Kod svih mjerenja zakretnog momenta treba paziti, kako je stroj ugrijan, jer se prema vrsti i izvedbi stroja moment može kod zagrijavanja povećati ili smanjiti. Zato je zgodno da se kod mjerenja označi, da li je izvedeno na hladnom ili na toplom stroju, jer nailazimo na razlike u zakretnom momentu i do 30%.

Dodatni gubici u kratkom spoju. U izmjeničnim i istosmjernim namotima armature električkih strojeva nastaju, kad teče struja, gubici, koji su veći nego što bismo očekivali na osnovu otpora, izmjerenih istosmjernom strujom ili izračunatih. Djelatni otpor, koji se protivi izmjeničnoj struji ili istosmjernoj struji, koja komutira, mora dakle biti veći od ovog t. zv. istosmjernog otpora. Razlog su tome gubici vrtložnih struja, koji nastaju zbog potiskivanja struje u samom bakru, zatim dodatni gubici, koji se pokazuju u aktivnom željezu i u susjednim metalnim dijelovima. Možemo ih odrediti u pokusu kratkog spoja zajedno s normalnim djelatnim gubicima. Kako kod sinhronih strojeva i kod transformatora nema poteškoća da ih izmjerimo, to ih kod obje ove vrste strojeva uvijek i određujemo mjerenjem. Mjerimo ukupne dovedene gubitke uz struju kratkog spoja nominalne vrijednosti. Od ovih odbijemo čiste gubitke u bakru, uzevši u obzir otpor namota za vrijeme mjerenja, a kod rotirajućih strojeva još i gubitke trenja. Onda nam preostaju dodatni gubici, koji mogu iznositi od 10 do 100% pravih gubitaka u bakru. Kod preračunavanja na druge vrijednosti struje ili od vrijednosti kod ispitivanja, koja je odstupala, na nominalnu vrijednost struje, mijenjaju se ovi kvadratično sa strujom, kao i gubici u bakru.

Ma da bismo kod istosmjernih strojeva u principu mogli također izvoditi takvo mjerenje u kratkom spoju, ipak odustajemo od toga pokusa zbog prevelikih izvora pogrešaka i netočnosti kod provedbe i razrade. To isto vrijedi za asinhrone i ostale vrste strojeva. Tu uzimamo u obzir dodatne gubitke stalnim postotkom električki pretvorene snage kod nominalnog opterećenja, te ih preračunavamo kod promjena opterećenja kvadratično sa strujom. Pravila (REM) propisuju određene postotke od 0,5 do 1%, koji su navedeni u poglavlju o korisnosti i koje treba smatrati obaveznim vrijednostima kod određivanja korisnosti. Stvarne vrijednosti mogu, naravno, od toga odstupati, te su gdjekada, na pr. kod malih asinhronih motora i izmjeničnih kolektorskih strojeva, čak i veće od pretpostavljenih iznosa.

G. POKUS ZALETA

Svrha i provedba pokusa. Pokus zaleta služi nam za *mjerenje poteznog momenta* velikih strojeva, kod kojih moramo odustati od upotrebe poluge, torzionog štapa i metode protustruje zbog odviše velikih momenata i snaga kratkog spoja. Zakretni moment od 500 mkg možemo uopće praktički smatrati gornjom granicom za pokuse kod mirovanja, a zaista dobro i jednostavno možemo mjeriti momente čak samo do cca 200 mkg. Osim toga dobivamo razradom pokusa zaleta točku po točku čitavu *krivulju zakretnog momenta u zavisnosti o brzini vrtnje,* i zbog toga izvodimo taj pokus i na drugim motorima, kad treba odrediti ovu karakteristiku.

Pokus izvodimo tako, da neopterećeni motor, obično spojen sa strojem ispitne stanice, priključimo na mrežu i oscilografski snimimo krivulju brzine vrtnje od mirovanja do brzine vrtnje praznog hoda, zajedno sa strujom i naponom na stezaljkama. Za pokazivanje brzine vrtnje upotrebljavamo napon slabo nezavisno uzbuđenog stroja ispitne stanice ili u slučaju da motor kreće sam, napon malog prigrađenog tahometarskog dinama. Ovaj je dobro izvesti s jako povećanim rasporom, da bi iz krivulje napona po mogućnosti iščezli viši harmonički valovi uzrokovani utorima. U oscilogramu dobivamo tada jasnu crnu krivulju, koju je osobito lako grafički razraditi.

Kod zaleta razvija motor moment, koji zavisi o brzini vrtnje, koju motor upravo prelazi, i koji postaje nula istom kad je postignuta puna brzina. Najveći dio ovog momenta služi za ubrzanje zamašnih masa svih rotirajućih dijelova, a tek mali dio za svladavanje momenata trenja, kao i za pokrivanje malih gubitaka u željezu slabo uzbuđena spojkom priključena stroja ispitne stanice. Na osnovu veze između ubrzanja, zamašne mase i zakretnog momenta:

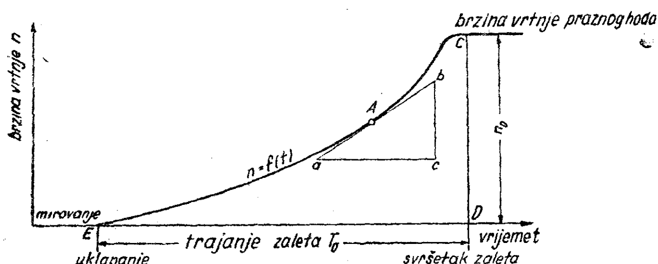
$$M = \frac{GD^2}{4g} \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{GD^2}{4g} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt},$$

pri čemu je
GD^2 = zamašni moment u kgm²,
n = brzina vrtnje u okr/min,
t = vrijeme u sek,
g = 9,81 m/sek²,
M = zakretni moment u mkg,

možemo naknadno odrediti zakretni moment, koji je uzrokovao ubrzanje, što smo ga ustanovili kod zaleta. Dodamo li ovom momentu ubrzanja još moment trenja stroja za opterećenje, odredili smo time korisni moment, što ga daje motor. Pribrojimo li još i vlastiti moment trenja ispitivanog motora, dobit ćemo ukupni moment, koji proizvodi rotor motora. Moment trenja velikih motora bit će reda veličine od 0,3 do 0,7% nominalnog momenta, ako se radi, kao što je obično slučaj, o sinhronim ili asinhronim motorima. Moment trenja stroja za opterećenje, obično jednako velikog, koji je uvijek istosmjerni stroj, leži nešto više, naime oko 1,0 do 2,0% njegovog nominalnog momenta. Srednji moment, koji motor razvija za vrijeme zaleta, iznosi cca 50 do 150% nominalnog momenta, a točnost mjerenja kreće se u granicama od ± 5%. Prema tome je zaista dovoljno odrediti samo moment ubrzanja i uzeti ga kao moment, koji daje motor. Kod razrade treba ipak razmotriti red veličine pogreške, koju smo time učinili.

Kod **razrade** polazimo od određivanja ubrzanja *dn/dt*, dakle povećanja brzine vrtnje u jedinici vremena. Tu imamo različite putove. U praksi je najzgodniji put grafička razrada krivulje brzine vrtnje s oscilograma

zaleta. Na sl. 12 prikazan je takav snimak, pa je na pr. potrebno odrediti ubrzanje u točki *A*. U tu svrhu nacrtamo, prislonivši ravnalo u točki *A*, tangentu. Na njoj označimo bilo koje dvije točke *a* i *b*, te povučemo kroz njih horizontalu i vertikalu, koje se sijeku u točki *c*. Tako smo dobili trokut *abc*. U ovome je visina *bc* proporcionalna povećanju brzine vrtnje, a dužina *ac* vremenu, u kojemu je ono nastalo. Vrijednost (razlika brzine vrtnje = bc) podijeljena s vrijednošću (razlika vremena = ac), jednaka je dakle stvarnom ubrzanju u točki *A*; *b*-*c* je naravno dužina u mm, koju



Sl. 12. Krivulja zaleta asinhronog motora. (Određivanje ubrzanja u točki *A*).

treba tek preračunati u okr/min, a *a*-*c* dužina u mm, koju treba tek preračunati u sek. To vršimo mjerilom za brzinu vrtnje m_r i mjerilom za vrijeme m_t, množenjem dužina u mm s ovim mjerilima. Izračunavamo ih:

$$\text{mjerilo za brzinu vrtnje } m_r = \frac{\text{brzina vrtnje praznog hoda u okr/min}}{\text{dužina } CD \text{ u mm}}$$

$$\text{mjerilo za vrijeme } m_t = \frac{\text{trajanje zaleta u sek}}{\text{dužina } ED \text{ u mm}}.$$

Računski dobivamo dakle ubrzanje u okr/min na sekundu u točki *A*:

$$\text{ubrzanje}_A = \frac{(\text{dužina } bc \text{ u mm}) \cdot \text{mjerilo za brzinu vrtnje}}{(\text{dužina } ac \text{ u mm}) \cdot \text{mjerilo za vrijeme}}.$$

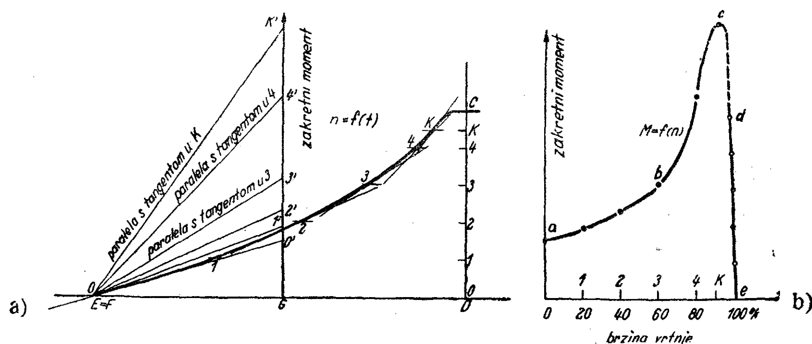
Traženi zakretni moment za istu točku iznosi tada:

$$\text{zakretni moment}_A \text{ u mkg} = \frac{\text{ubrzanje}_A \cdot \text{zamašni moment}}{375}$$

gdje treba zamašni moment uvrstiti u kgm^2.

Na isti način možemo istraživati sve ostale točke, napose dakle i točku mirovanja. Odavle dobivamo vrijednost poteznog momenta. Zadovoljavamo se razradom 5 do 10 točaka, koje dostaju, da prikažemo krivulju zakretnog momenta. Iz praktičnih razloga ne crtamo za svaku točku takav mali pomoćni trokut, već određujemo za pojedine točke samo tangente. Ove onda paralelno pomaknemo, dok ne budu sve prolazile istom po volji odabranom točkom na nul-liniji brzine vrtnje. Na sl. 13 označena je ta točka sa *F*. Drugu točku *G* ucrtamo desno na nul-liniji u razmaku, koji je

sam po sebi proizvoljan, te položimo kroz nju vertikalu prema gore. Paralelno pomaknute tangente sijeku ovu vertikalu u točkama, koje su označene na odgovarajući način sa 0', 1', 2' i t. d. Dužine od ovih sjecišta do nožišta G neposredna su mjera za ubrzanje, a time i za sam zakretni moment u pojedinim točkama krivulje zaleta 0, 1, 2..., jer one sve prikazuju prirast



Sl. 13. Razrada krivulje zaleta metodom tangente (a: krivulja zaleta s tangentama, koje su paralelno pomaknute, tako da prolaze zajedničkom točkom *F*, koja se podudara sa *E*. b: karakteristika zakretni moment-brzina vrtnje. Dio krivulje *abc* iz krivulje zaleta; dio krivulje *ed* iz pokusa opterećenja; dio krivulje *cd* nadopunjen na odgovarajući način).

brzine vrtnje u istom vremenu, naime u razlici vremena, koja odgovara dužini *FG*. Stoga uopće ne treba izračunavati ubrzanje, već odmah određujemo moment u mkg. U tu svrhu treba izračunati samo mjerilo za moment m_M, koje dobivamo kao:

$$\text{mjerilo za zakretni moment } m_M = \frac{(GD^2 \text{ u kg m}^2) \cdot n_0}{375 \cdot (T_0 \text{ u sek})} \cdot \frac{(ED \text{ u mm})}{(CD \text{ u mm}) \cdot (FG \text{ u mm})}$$

gdje n_0 znači brzinu vrtnje praznog hoda u okr/min, a T_0 trajanje zaleta u sek. Zakretni moment na pr. u točki 4' dobivamo kao: (dužina 4' G) · mjerilo za moment.

Osobito je praktično odabrati dužinu *FG* tako, da dobijemo zgodnu vrijednost za mjerilo momenta u mkg ili pak u % nominalnog momenta stroja po 1 mm. Kod toga je zgodno uvesti pomak papira oscilograma u mm/sek, koji ćemo označiti sa *v*. Taj *v* je dakle broj milimetara, koji otpada na 1 sek. Da bismo dobili mjerilo za moment m_M, koje želimo, dakle na pr. = 1, 2, 5, 10 ili 50 mkg/mm, treba uzeti:

$$\text{dužina } (FG) \text{ u mm} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_0 v}{(C-D)} \cdot \frac{1}{m_M}$$

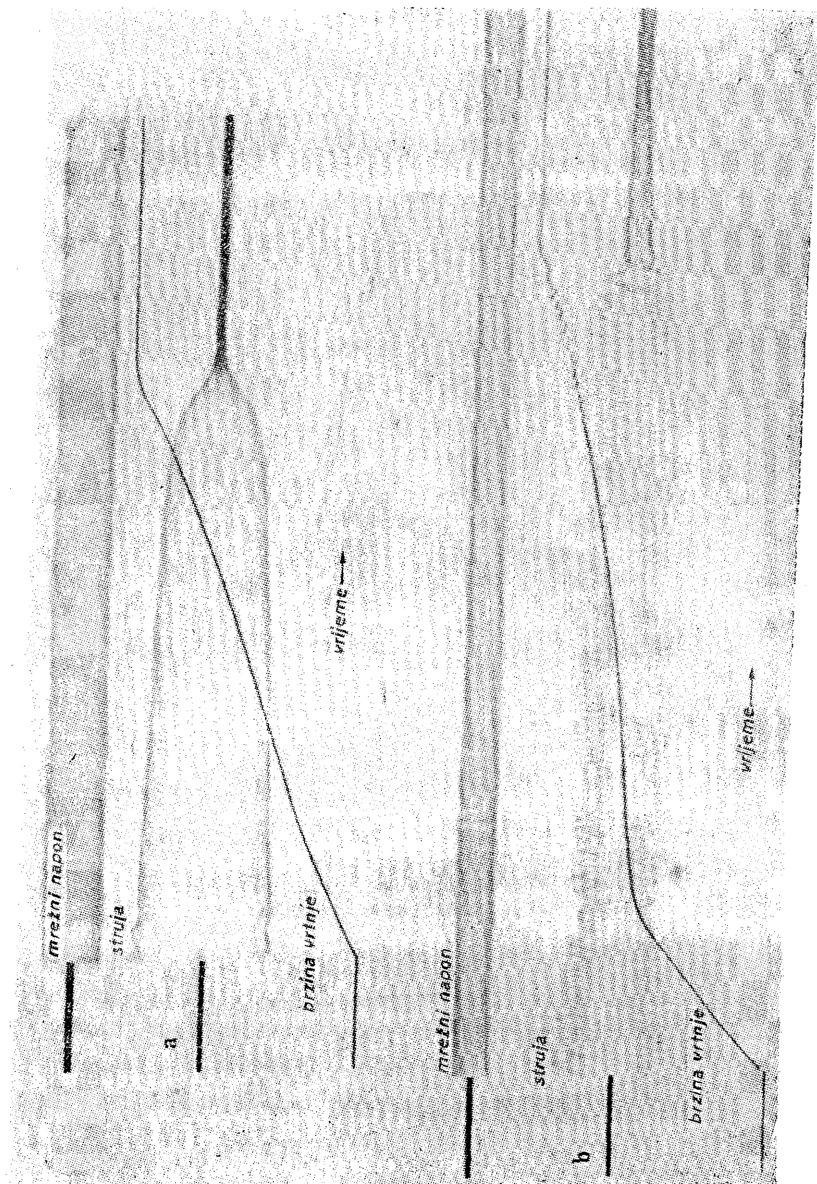
uz

n_0 = brzina vrtnje praznog hoda u okr/min,
v = pomak papira u mm/sek.

$(C—D)$ = razmak od nul-linije do brzine vrtnje praznog hoda u mm. Traženo procentualno mjerilo zakretnog momenta $m_{M\%}$ u $\%M_n$/mm dobivamo, ako uzmemo:

$$\text{dužina } (FG) \text{ u mm} = \frac{GD^2}{36{,}5} \cdot \frac{100\,v}{N_n} \cdot \left(\frac{n_0}{100}\right)^2 \frac{1-s}{(C-D)\cdot m_{M\%}},$$

pri čemu je N_n = nominalna snaga u kW, a s = klizanje.



Sl. 14. a i b. Oscilogram zaleta (asinhroni motor a, i sinhroni motor b)

Ako smo potezni moment posebno odredili kod mirovanja, možemo razraditi pokus zaleta i bez poznavanja GD^2. Mjerilo za moment određujemo onda kao:

$$m_M = \frac{\text{potezni moment u mkg}}{\text{dužina } \overline{OG} \text{ u mm}}.$$

Potezni moment treba naravno kvadratično preračunati na napon kod pokusa zaleta, ako smo pokus pri mirovanju izvodili kod drugog napona. Ako je GD^2 poznato, dobivamo iz oba pokusa dva puta vrijednost poteznog momenta, i time dobru kontrolu za oba pokusa.

Kad napon mreže popušta, potrebna je kod dobivenih vrijednosti momenta još i korekcija, kojom uzimamo u obzir pad napona. S oscilograma odredimo za pojedine brzine vrtnje vrijednosti pravog napona mreže i momente kvadratično preračunamo na napon, koji bi trebao biti. Struje, koje također prikazujemo u dijagramima zaleta, preračunavamo linearno s naponom.

Strmo silazni dio krivulje momenta u blizini brzine vrtnje praznog hoda kod asinhronih motora ne možemo odrediti iz pokusa zaleta onom točnošću, koja bi zadovoljavala. Vrlo točno ga možemo nacrtati na osnovu rezultata pokusa opterećenja, koji nam daje pripadne vrijednosti brzine vrtnje odnosno klizanja i zakretnog momenta. Svaka točka opterećenja daje nam po jednu točku ovog dijela karakteristike zakretni moment-brzina vrtnje, koja je u početku pravac, a u blizini prekretnog momenta se lagano zakrivljuje.

Ako zalet zbog male zamašne mase završava za kraće vrijeme od 1 do 2 sek, dobivamo rezultate, koji se zbog prijelaznih pojava unutar samog stroja ne slažu s onima, koje dobivamo u stacionarnom pogonu. Prije svega dobivamo obično premali prekretni moment. Da bismo dobili besprijekorne rezultate, ispitujemo motor sa smanjenim naponom ili ga spojimo s dovoljno velikom zamašnom masom stroja ispitne stanice. Sl. 14 a i b prikazuje tipične oscilograme zaleta asinhronog i sinhronog stroja.

H. POKUS ZAUSTAVLJANJA

Svrha i provedba pokusa. Pokus zaustavljanja služi za određivanje zamašnog momenta *(GD^2)* i u manjoj mjeri za mjerenje i razdvajanje gubitaka. Sastoji se od snimanja vremenske krivulje brzine vrtnje stroja kod zaustavljanja, pošto smo isključili pogon. Krivulja $n = f(t)$ zove se krivulja zaustavljanja.

Kod provedbe pokusa potjeramo sam ispitivani stroj ili njegov pogonski motor, i to po mogućnosti — povećanom frekvencijom ili povećanim naponom armature — do brzine, koja leži 10 do 20% iznad nominalne brzine vrtnje. Zatim ga odvojimo od mreže. Kod velikih strojeva,

gdje je vrijeme zaustavljanja veće od 1 min, očitavamo u vremenskim razmacima od 5 ili 10 sek (stop-ura) otklon tahometra ili voltmetra, koji mjeri napon bilo samog ispitivanog stroja, bilo pogonskog motora, bilo prigrađenog malog tahometarskog dinama. Stroj, koji daje napon, mora biti, naravno, nezavisno uzbuđen.

Kod kraćeg vremena zaustavljanja, otprilike između 1 min i nekoliko sekunda, najbolje je izvršiti snimanje oscilografski, jer tahometar ne možemo dovoljno brzo preklapati na niže mjerne opsege, a voltmetar je vrlo teško očitati, kad se kazaljka naglo vraća. Osim toga, iz malog broja mjerenih točaka ne možemo krivulju zaustavljanja točno nacrtati.

Manje strojeve dodatno opterećujemo prislonjenim tahometrom, pa se oni brže zaustavljaju. Kod njih se zato treba po mogućnosti služiti mjerenjem napona. Pripadni par vrijednosti brzine vrtnje i napona, koji odredimo prije isklapanja, omogućuje nam preračunavanje napona u brzinu vrtnje. Ako je kod toga stroj, koji daje napon, uzimao motorsku struju, treba od očitanja voltmetra odbiti 2 V, da bismo uzeli u obzir pad napona na četkicama. Reducirani napon uzmemo onda da je jednak mjerenoj brzini vrtnje.

Razrada pokusa zaustavljanja odgovara onoj kod pokusa zaleta, samo treba mjesto ubrzanja odrediti usporenje kod određene brzine vrtnje. Sl. 15a prikazuje krivulju zaustavljanja, kod koje treba za brzinu vrtnje n_1 odrediti usporenje u okr/min na sek. U tu svrhu položimo kroz točku A, kojoj odgovara brzina vrtnje n_1, tangentu na krivulju zaustavljanja, te je produžimo do sjecišta sa nul-linijom. Vremenska razlika T_1 od ovog sjecišta do nožišta točke A zove se »fiktivno trajanje zaustavljanja«. Ono bi bilo jednako faktičnom trajanju zaustavljanja računajući od prolaza kroz brzinu vrtnje n_1, kad se kočni momenti, koji u tom času djeluju ne bi mijenjali sve do mirovanja. Usporenje dobivamo kao (n_1 u okr/min) : (T_1 u sek).

Brzina vrtnje kod zaustavljanja pada zbog kočnih momenata, koji nastaju od trenja zraka i trenja u ležajima, trenja četkica, kao i ostalih gubitaka, koji gdjekada nastaju. Za svladavanje ovih momenata i pokrivanje ovih gubitaka raspoloživa je samo kinetička energija rotirajućih zamašnih masa, koja se u tu svrhu oslobađa uz neprestano padanje brzine vrtnje, pri čemu vrijedi relacija:

$$M = \frac{GD^2}{4g} \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{GD^2}{4 \cdot 9{,}81} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{GD^2 \cdot n_1}{375 \cdot T_1}$$

uz ω = kutna brzina = $2\pi n/60$,

n = brzina vrtnje u okr/min,

$9{,}81 = g$ = ubrzanje gravitacije u m/sek^2,

n_1 = promatrana vrijednost brzine vrtnje,

T_1 = pripadno fiktivno trajanje zaustavljanja u sek.

Uvrstimo li mjesto kočnog momenta odgovarajuće kočne gubitke $N_{koč}$ u kW, dobivamo praktički važniju relaciju:

$$N_{koč} = \frac{M \cdot \omega \cdot 9{,}81}{1000} = \frac{GD^2}{4 \cdot 9{,}81} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dn}{dt} \cdot \frac{2\pi n}{60} \cdot \frac{9{,}81}{1000} = \frac{GD^2 \cdot n_1^2}{365000 \cdot T_1}.$$

Odavde razabiramo, da uz poznate tri od ove četiri vrijednosti: GD^2, $N_{koč}$, n_1 i T_1, možemo izračunati četvrtu. Vezu između n_1 i T_1 predstavlja krivulja zaustavljanja. Poznajemo li dakle kočne gubitke, koji nastaju za vrijeme zaustavljanja, možemo izračunati GD^2; poznajemo li GD^2, možemo izračunati nepoznate gubitke. Izvedemo li dva ili više pokusa *a, b, c* i t. d., možemo ako smo u prvom pokusu unaprijed odredili gubitke, odrediti dodatne gubitke kod daljnjih pokusa iz promijenjenih »fiktivnih trajanja zaustavljanja« T_1, T_1 i t. d., a da i ne poznajemo GD^2.

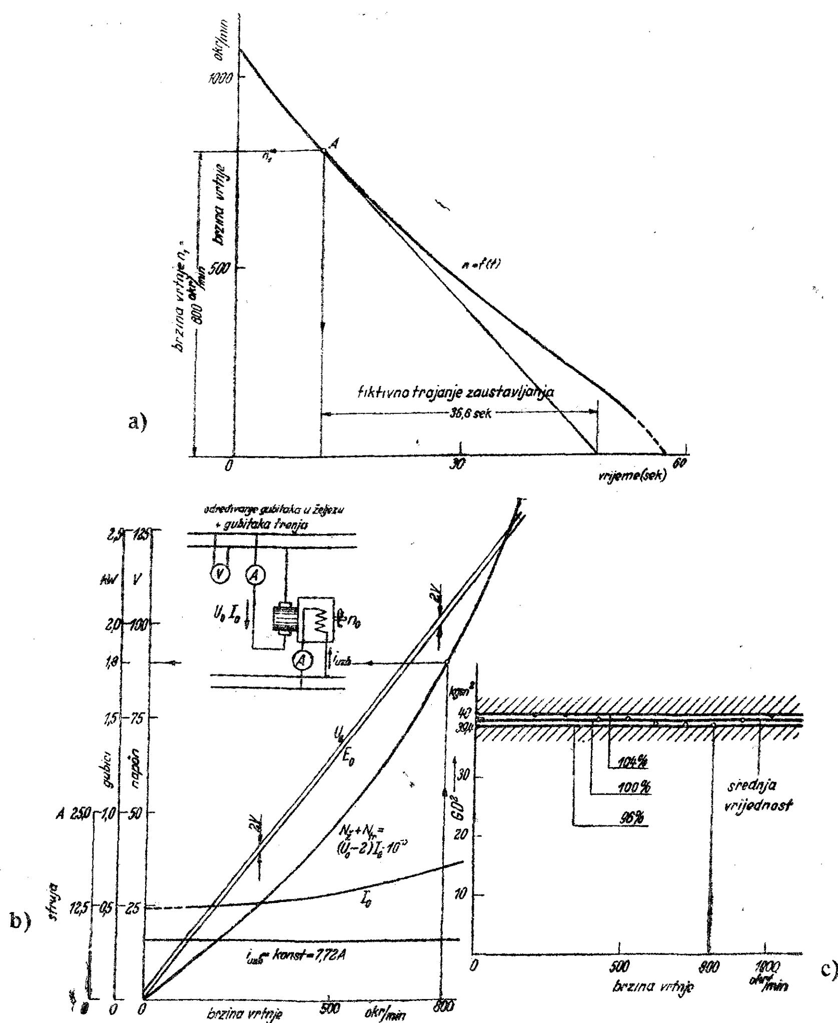
Određivanje GD^2. a) Istosmjerni stroj ili sinhroni ili asinhroni stroj, koji tjeramo istosmjernim strojem ispitne stanice. Stroj ili grupu potjeramo na nominalnu brzinu vrtnje. Iza nekoliko minuta očitamo napon i struju, koju armatura uzima iz mreže. Iz ovih vrijednosti izračunamo snagu gubitaka $N_ž + N_{tr} = (U_0 - 2) \cdot I_0/1000$. Zatim povećamo brzinu vrtnje za 20% povećavanjem napona na armaturi, ali nipošto slabljenjem polja. Za kontrolu očitamo još jedamput napon i brzinu vrtnje. Omjer povećanog napona manje 2 V prema povećanoj brzini vrtnje mora biti isti, kao $(U_0 - 2)$ prema n_n. Sada mrežu isklopimo. Stroj se, odnosno grupa počinje zaustavljati s nepromijenjenom uzbudnom strujom. Svakih 5 sek mjerimo brzinu vrtnje odnosno napon armature. Točno mjerimo čas, kad se stroj zaustavi. Zatim nacrtamo krivulju n u zavisnosti o vremenu t. U točki, kojoj odgovara brzina vrtnje n_n, povučemo tangentu i odredimo fiktivno trajanje zaustavljanja T_n. GD^2 dobivamo tada kao:

$$GD^2 = \frac{365000 \cdot T_n \cdot (N_ž + N_{tr})}{n_n^2} \text{ u kgm}^2,$$

$$= \frac{365 \cdot T_n \cdot (U_0 - 2) \cdot I_0}{n_n^2}.$$

Ako treba točno odrediti zamašni moment, snimimo gubitke kod više brzina vrtnje uz nepromijenjenu uzbudu. Mijenjamo dakle u širokim granicama napon armature, te za svaku točku mjerimo brzinu vrtnje n_0, napon U_0 i struju I_0, koju uzima armatura. Odavle izračunamo vrijednosti $(U_0 - 2) \cdot I_0$, i nanosimo ih najbolje u zavisnosti o brzini vrtnje (sl. 15b). Zatim izvedemo pokus zaustavljanja, te ga za kontrolu ponovimo. Sada odredimo za čitav niz brzina vrtnje n »fiktivno trajanje zaustavljanja« T, očitamo s krivulje gubitaka pripadne vrijednosti kočnih gubitaka, te izračunamo vrijednosti, koje izlaze za GD^2. Kod pomnog mjerenja i razrade

odstupaju pojedine vrijednosti zamašnog momenta samo za cca ± 5% od srednje vrijednosti. Prikažemo li vrijednosti GD^2 u zavisnosti o brzini



Sl. 15. a—c. Pokus zaustavljanja za određivanje GD^2

a) Brzina vrtnje kod zaustavljanja = f (vremena)

b) Određivanje gubitaka u željezu i gubitaka trenja

c) $GD^2 = f$ (brzine vrtnje)

Primjer: $n = 800$ okr/min, $T = 36{,}6$ sek, $N_{\check{z}} + N_{tr} = N_0 = 1{,}8$ kW

$$GD^2 = \frac{365000 \cdot 36{,}6 \cdot 1{,}8}{800^2} = 37{,}6 \text{ kgm}^2$$

vrtnje, dobivamo cik-cak krivulju, kao što je prikazana na sl. 15c. Ako ne uzmemo u obzir pad napon na četkicama od 2 V, dobivamo kod manjih brzina vrtnje prevelike vrijednosti za zamašni moment.

Razumije se, da uvijek dobivamo ukupni GD^2 grupe strojeva. GD^2 ispitivanog stroja dobivamo tek kad odbijemo zamašni moment spojkom priključenog stroja ispitne stanice, koji zato ne smije biti mnogo veći, ako želimo točne vrijednosti.

b) Sam sinhroni stroj, uzbuđen. Stroj dovedemo do nominalne brzine vrtnje i udesimo uzbudnu struju tako, da struja, koju uzima iz mreže bude najmanja, dakle $\cos \varphi_0 = 1{,}0$. Tada očitamo vatmetre. Kako su gubici u bakru armature mali, možemo uzeti, da očitanja obaju vatmetara daju $N_ž + N_{tr}$. Povećanjem dovedene frekvencije povećamo zatim brzinu za 10 do 20%, te isklopimo mrežu. Stroj ostaje uzbuđen. Zaustavljanje snimamo najbolje s pomoću malog tahometarskog dinama. Kod razrade upotrebljavamo formulu:

$$GD^2 = \frac{365000 \cdot T \cdot N_0}{n_n^2},$$

gdje N_0 znači gubitke praznog hoda u kW.

c) Sam asinhroni stroj. Ovaj stroj može se zaustavljati jedino neuzbuđen. Kao kočni gubici dolaze u obzir samo gubici trenja. Ove dakle treba odrediti posebnim mjerenjem. Stroj potjeramo na nominalnu brzinu vrtnje i očitamo snagu, koju uzima, struju, koju uzima i priključeni napon. Zatim smanjujemo napon u više stepena i svaki put izvedemo mjerenje. Kao što je opisano u I. dijelu pod D, određujemo sada gubitke trenja, tako da nanesemo gubitke praznog hoda, smanjene za gubitke strujne topline u zavisnosti o kvadratu napona, te krivulju položenu kroz te točke (približno pravac) produžimo do sjecišta s ordinatom. Kod razrade upotrebljavamo formulu:

$$GD^2 = \frac{365000 \cdot T \cdot N_{tr}}{n_n^2}.$$

I kod ovog stroja također povećamo brzinu vrtnje prije početka zaustavljanja povećanjem frekvencije.

d) Zbog gubitaka u željezu, koji nastaju kod uzbuđenih strojeva, zaustavit će se ovi brže nego što je to slučaj kod neuzbuđenih strojeva. Zato u praksi dajemo gdjekada prednost onim metodama zaustavljanja, kod kojih ispitivani stroj tjeramo strojem ispitne stanice, a brzinu vrtnje dobivamo očitanjem napona posebnog tahometarskog dinama. U tom slučaju odvojimo ne samo armaturu, nego i uzbudu pogonskog stroja od mreže, kad počinjemo zaustavljanje. Kako djeluju samo gubici trenja, moramo ih odrediti kod određene brzine vrtnje snimanjem gubitaka kod različitih napona, kao što je opisano pod c). Ako s bilo kojeg razloga ne želimo prekoračiti nominalnu brzinu vrtnje ispitivanog stroja, t. j., ako zaustavljanje započinjemo s nominalnom brzinom vrtnje, preporučuje se da odredimo gubitke trenja kod 80% nominalne brzine, te da razradimo krivulju zaustavljanja

u odgovarajućoj točki. Nikada ne treba određivati fiktivno trajanje zaustavljanja za početnu točku krivulje, jer tamo ne možemo sigurno konstruirati tangentu.

Mjerenje gubitaka. Ovu metodu primjenjujemo kod određivanja gubitaka kratkog spoja velikih sinhronih strojeva, koje s bilo kojeg razloga ne možemo tjerati mehanički. Ispitivani stroj potjeramo povećanjem frekvencije preko nominalne brzine vrtnje. Tada odvojimo mrežu, isključimo uzbudu, uspostavimo kratki spoj na stezaljkama, te opet uključimo uzbudu. Vrijednost uzbudne struje udesimo na onaj iznos, koji će izazvati traženu struju kratkog spoja u namotu armature, dakle najbolje nominalnu struju. Sva spajanja i udešavanja moraju biti dovršena prije no što stroj u zaustavljanju prođe nominalnu brzinu vrtnje. Za pokazivanje brzine vrtnje upotrebljavamo napon slabo uzbuđena prigrađenog uzbudnog generatora.

Na krivulju zaustavljanja povučemo tangentu u točki, koja odgovara nominalnoj brzini vrtnje i odredimo »fiktivno trajanje zaustavljanja« T_n. Tražene gubitke kratkog spoja u kW dobivamo kao:

$$N_k = N_{Cu} + N_{dod} = \frac{GD^2 \cdot n_n^2}{365000 \cdot T_n} - N_{tr} .$$

Iznos gubitaka trenja uzimamo iz rezultata pokusa praznog hoda. Ponovimo li pokus s različitim uzbudnim strujama, dakle različitim strujama kratkog spoja, dobit ćemo niz vrijednosti za gubitke kratkog spoja, koje moraju vrlo približno kvadratično zavisiti o struji.

Razdvajanje gubitaka. Izvedemo li pokus zaustavljanja na istom stroju jedamput neuzbuđenom, a zatim uz različito velike uzbudne struje kod otvorenih stezaljki, moraju se »fiktivna trajanja zaustavljanja« za jednu te istu brzinu vrtnje očito odnositi obrnuto kao pripadni gubici. Ako smo mjerenjem odredili jednu jedinu vrijednost gubitaka, možemo stoga sve ostale gubitke dobiti jednostavnim preračunavanjem iz ove vrijednosti. Kao primjer promotrimo istosmjerni stroj. Izmjerili smo gubitke u željezu + gubitke trenja kod nominalne brzine vrtnje i nominalnog napona, pa treba zasebno odrediti gubitke trenja. Provedemo dakle jedno zaustavljanje »a« s punom uzbudom i nadovežemo drugo zaustavljanje »b« s neuzbuđenim strojem. T_a i T_b neka su pripadna fiktivna trajanja zaustavljanja. Tada dobivamo:

$$N_{tr} = (N_ž + N_{tr}) \cdot \frac{T_a}{T_b} .$$

Kako vidimo, razdvojili smo gubitke, po čemu smo i nazvali pokus. Praktička primjena je vrlo rijetka, jer gotovo uvijek dajemo prednost razdvajanju grafičkom metodom kod pokusa praznog hoda.

I. KORISNOST

Korisnost predstavlja kod svih strojeva, generatora, motora, transformatora i agregata omjer korisno predane snage prema ukupno dovedenoj snazi. Kod promjenljiva opterećenja govorimo gdjekada i o srednjoj korisnosti unutar određenog vremenskog intervala kao o omjeru između korisno upotrebljene i ukupno dovedene energije. Treba naročito naglasiti, da nema formula, koje bi se po svojoj definiciji međusobno razlikovale, kao na pr. za motore i za generatore. Ako gdjekada i govorimo o motorskoj ili generatorskoj formuli, to se radi tek o vanjskoj razlici zbog toga, što u oba slučaja uvodimo električku snagu, koju možemo udobno mjeriti. Kod motora je to dovedena, a kod generatora predana snaga. Općenito vrijedi:

$$\text{korisnost} = \frac{\text{predana snaga}}{\text{dovedena snaga}},$$

pri čemu je (predana snaga) = (dovedena snaga — ukupni gubici).

Postupke za određivanje korisnosti možemo principijelno podijeliti u obje grupe direktnih i indirektnih postupaka, koje ćemo u osnovnim crtama dalje prikazati. Put, koji treba odabrati u pojedinom slučaju, točno je obrađen kod različitih vrsta strojeva.

Direktno određivanje korisnosti. Kod ove metode određujemo korisnost direktno iz omjera predane i dovedene snage. Kod transformatora, jednoarmaturnih pretvarača, kaskadnih pretvarača i motorgeneratora pojavljuju se obje snage u električkom obliku, te ih određujemo mjerenjem instrumentima. Na strani trofazne struje moramo kod toga mjeriti u spoju triju ili dvaju vatmetara. Na istosmjernoj strani daje snagu produkt napona i struje.

Kod motora primjenjujemo sve vrste kočenja, kod kojih možemo lako odrediti kočnu snagu. Ovu određujemo, kao što je navedeno u I. dijelu pod K i L, iz kočnog momenta i brzine vrtnje. Kod generatora postupamo obratno. Dovedenu mehaničku snagu odredimo iz zakretnog momenta i brzine vrtnje, te mjerimo predanu električku snagu. Ako raspolažemo baždarenim strojem ispitne stanice, možemo motore ili generatore spojiti s ovim u motorgeneratorsku grupu.

Korisnost dobivamo tada:

$$\text{korisnost stroja} = \frac{\text{korisnost grupe}}{\text{korisnost stroja ispitne stanice}} =$$

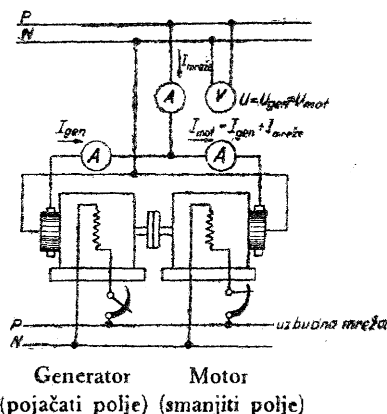
$$= \frac{\text{predana električka snaga}}{\text{dovedena električka snaga}} \cdot \frac{1}{\text{korisnost stroja ispitne stanice}}.$$

Kod ove direktne metode ne treba zaboraviti, da točnost općenito možemo uzeti najviše 1%, jer pogreške čak kod točnog određivanja mjerenih veličina napona, struje, snage, brzine vrtnje i zakretnog momenta leže već

između 0,2 i 0,5%, a ukupna pogreška može da bude jednaka zbroju svih učinjenih pojedinačnih pogrešaka. Stoga direktnu metodu određivanja korisnosti primjenjujemo samo kod strojeva sa korisnošću od cca 80 do 90% i ispod toga. Prednost joj pak dajemo kod ispitivanja izmjeničnih kolektorskih strojeva sve do najvećih snaga.

Indirektno određivanje korisnosti. Ova se metoda u principu osniva na mjerenju samih gubitaka. Točnost je znatno veća nego kod direktne metode, jer se nesigurnosti i netočnosti kod određivanja gubitaka pojavljuju u korisnosti tek kao pogreške drugoga reda.

Metoda povratnog rada. Povratni rad primjenjujemo tamo, gdje imamo dva potpuno jednaka stroja, koje možemo upotrebiti kao generator i kao motor. Strojeve povežemo spojkom, te ih električki međusobno spojimo. Kod rada dolazi onda do optoka energije. Generator predaje električku energiju, motor je uzima i pretvara u mehaničku energiju. Ovu dovodimo preko osovine opet generatoru. Neizbježive gubitke možemo pokriti dodatnim mehaničkim pogonom generatora ili tako, da motor dodatno električki pojimo iz mreže. Ovo posljednje izvodimo gotovo uvijek s pomoću paralelno priključene mreže, tek rijetko pomoćnim strojem spojenim u seriju. Ovaj pošljednji postupak ovdje tek spominjemo.



Generator (pojačati polje) Motor (smanjiti polje)

Sl. 16. Povratni rad istosmjernih strojeva s pokrivanjem gubitaka električki iz mreže (Kod određivanja korisnosti motora treba udesiti: $U = (U_n - I_n \cdot R - 2)$; $I_{mot} + I_{gen} = 2\,I_n$; $n = n_n$. **Kod generatora:** $U = (U_n + I_n \cdot R + 2)$; $I_{mot} + I_{gen} = 2I_n$; $n = n_n$. **Ukupni gubici jednog stroja kod nominalnog pogona jednaki su:**

$$N_{g_{uk}} = \tfrac{1}{2}\, U \cdot I_{mreže} + U_{uzb} \cdot i_{uzb_n}.)$$

Istosmjerne strojeve, k o d k o j i h g u b i t k e p o k r i v a m r e ž a, ispitujemo u spoju prema sl. 16. Obje struje, koje se međusobno nešto razlikuju, udesimo tako, da njihova suma bude jednaka dvostrukoj nominalnoj struji, dakle da bude $I_{gen} + I_{mot} = 2I_n$. Naponi obaju strojeva su naravno jednaki. Ako želimo odrediti korisnost strojeva kao generatora, udesimo mrežni napon na vrijednost:

$$U = U_n + I_n \cdot R + 2,$$

a želimo li naći korisnost motora, udesimo napon na vrijednost:

$$U = U_n - I_n \cdot R - 2.$$

Onda u oba stroja zajedno nastaju gubici u bakru, gubici prijelaza na četkicama, gubici trenja i gubici u željezu dvostruko veći od onih kod nominal-

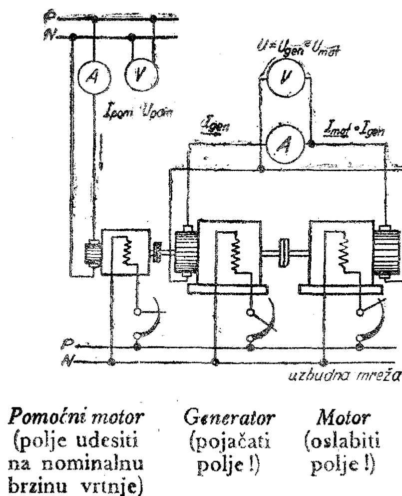
nog rada, a jednaki snazi $N_{mreže}$, koju stroj uzima iz mreže. Korisnost izračunavamo:

$$\eta_{gen} = \frac{2\,U_n \cdot I_n}{2\,(U_n \cdot I_n + U_{uzb} \cdot i_{uzb\,n}) + N_{mreže}}$$

kod generatora, te

$$\eta_{mot} = \frac{2\,U_n \cdot I_n - N_{mreže}}{2\,U_n \cdot I_n + 2\,U_{uzb} \cdot i_{uzb\,n}}$$

kod motora. Kod toga je U_n nominalni napon, a I_n nominalna struja armature. Uzbudnu struju $i_{uzb\,n}$ treba uzeti s krivulje regulacije stroja.



Sl. 17. Povratni rad **istosmjernih strojeva** s mehaničkim pokrivanjem gubitaka

(**Kod** određivanja korisnosti motora treba udesiti: $U = (U_n - I_n \cdot R - 2$; $I_{mot} = I_{gen} = I_n$; $n = n_n$. Kod generatora: $U = (U_n + I_n \cdot R + 2)$; $I_{mot} = I_{gen} = I_n$; $n = n_n$. Ukupni gubici jednog stroja kod nominalnog pogona jednaki su: $N_{g_{uk}} = \frac{1}{2}\,(U_{pom} \cdot I_{pom} - No_{pom} - I_{pom}\,[2 + I_{pom} \cdot R_{pom}]) + U_{uzb} \cdot i_{uzb_n}$.)

Kod mehaničkog pokrivanja gubitaka u spoju prema sl. 17, struja i napon obaju strojeva međusobno su jednaki. Jakost struje udesimo na nominalnu vrijednost I_n, a napon na iste vrijednosti kao kod predašnjeg spoja za povratni rad. Gubici u željezu i gubici trenja kao i gubici strujne topline u krugu armature jednaki su dvostrukim normalnim gubicima i jednaki su snazi, koju daje pomoćni motor na osovini. Ako ovaj ima napon na armaturi U_{pom}, i uzima struju I_{pom} ako mu uži gubici praznog hoda iznose No_{pom}, te ima otpor armature R_{pom}, računamo korisnost:

$$\eta_{gen} = \frac{U_n \cdot I_n}{(U_n \cdot I_n + U_{uzb} \cdot i_{uzb\,n}) + 0{,}5\,(U_{pom} \cdot I_{pom} - No_{pom} - I_{pom}\,[R_{pom} \cdot I_{pom} + 2])}$$

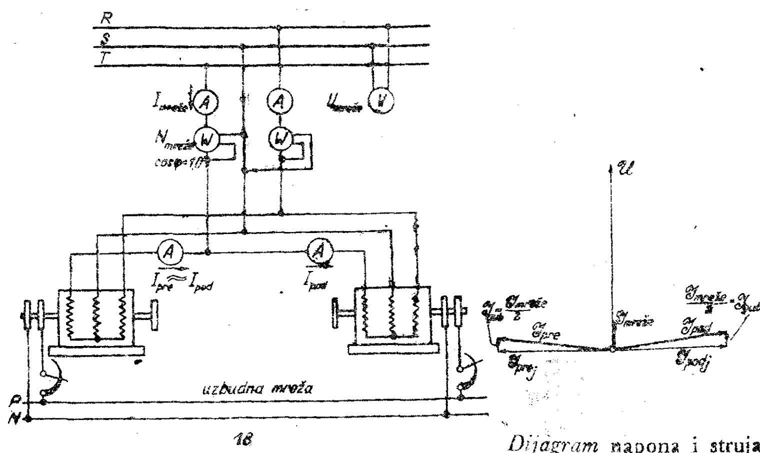
kod generatora, te

$$\eta_{mot} = \frac{U_n \cdot I_n - 0{,}5\,(U_{pom} \cdot I_{pom} - No_{pom} - I_{pom}\,[R_{pom} \cdot I_{pom} + 2])}{U_n \cdot I_n + U_{uzb} \cdot i_{uzb\,n}}.$$

kod motora.

Povratni rad sinhronih strojeva s pokrivanjem gubitaka iz mreže može se vršiti bez mehaničkog spajanja u spoju prema sl. 18. Oba stroja uzimaju iz mreže praktički istu malu struju gubitaka I_{gub}. Jedan stroj preuzbudimo, drugi poduzbudimo. Veličinu jalove struje udesimo

na nominalnu struju. Finim udešavanjem uzbudne struje udesimo struju mreže na najmanju vrijednost. Iz mreže uzimamo dakle samo djelatnu



Dijagram napona i struja

Generator jalove snage (pre)
(polje preuzbuditi!)

Potrošač jalove snage (pod)
(polje poduzbuditi!)

Kod mehaničkog spoja možemo prema međusobnom zakretu obiju polovina spojke udesiti svaku djelatnu snagu po želji.

Sl. 18. **Povratni rad sinhronih strojeva s pokrivanjem gubitaka električki iz mreže**
(Kod određivanja korisnosti motora ili generatora treba udesiti: $U = U_n$; $I_{pre} \approx I_{pod} = I_n$; $f = f_n$. Ukupno gubici jednog stroja kod nominalnog pogona iznose: $N_{g_{uk}} = \frac{1}{2} N_{mreže} + U_{uzb} \cdot i_{uzb_n}$.)

snagu, koju mjerimo s dva vatmetra. Neka ova iznosi $N_{mreže}$. Korisnost određujemo:

$$\eta_{gen} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos\varphi_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos\varphi_n + 0{,}5 \cdot N_{mreže} + U_{uzb} \cdot i_{uzb\,n}}$$

kod generatora, te

$$\eta_{mot} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos\varphi_n - 0{,}5 \cdot N_{mreže}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos\varphi_n + U_{uzb} \cdot i_{uzb\,n}}$$

kod motora.

Mrežni napon treba kod ovog pokusa udesiti na vrijednost U_n. Uzbudnu struju $i_{uzb\,n}$ treba uzeti sa karakteristika regulacije ili sa švedskog dijagrama (str. 172.).

P o k r i v a n j e   g u b i t a k a   p o m o ć n i m   m o t o r o m prikazano je na sl. 19. Napon udesimo na nominalnu vrijednost U_n. Korisnost računamo:

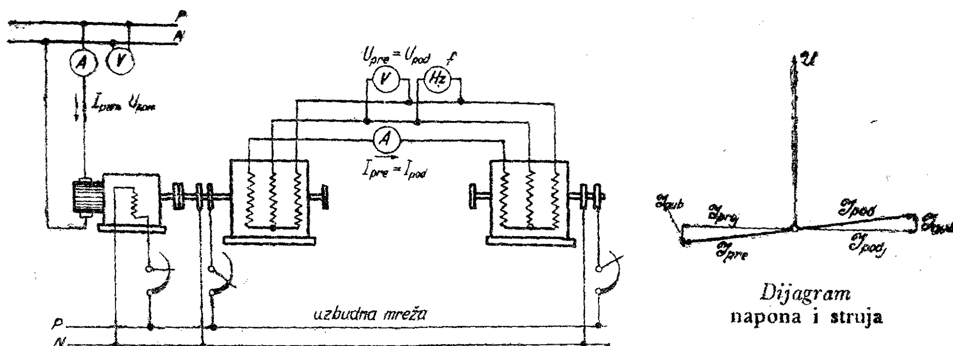
$$\eta_{gen} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos\varphi_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cos\varphi_n + U_{uzb} \cdot i_{uzb\,n} + 0{,}5\,(U_{pom} \cdot I_{pom} - No_{pom} - I_{pom}\,[R_{pom} \cdot I_{pom} + 2])}$$

kod generatora, te

$$\eta_{mot} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos\varphi_n - 0{,}5\,(U_{pom} \cdot I_{pom} - No_{pom} - I_{pom}\,[R_{pom} \cdot I_{pom} + 2])}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos\varphi_n + U_{uzb} \cdot i_{uzb\,n}}$$

kod motora.

Spojimo li sinhrone strojeve kod povratnog rada spojkom, možemo međusobnim zakretanjem obiju polovina spojke udesiti optok djelatne



Pomoćni motor (polje udesiti na nominalnu frekvenciju sinhronih strojeva)

Generator jalove snage (pre) (polje preuzbuditi!)

Potrošač jalove snage (pod) (polje poduzbuditi!)

opaske vidi na slici 18

Sl. 19 Povratni rad sinhronih strojeva uz mehaničko pokrivanje gubitaka pomoćnim motorom

(Kod određivanja korisnosti motora ili generatora treba udesiti: $U_{pre} = U_{pod} = U_n$; $I_{pre} = I_{pod} = I_n$, $f = f_n$. Ukupni gubici jednog stroja kod nominalnog pogona iznose: $N_{g_{uk}} = \frac{1}{2}\,(U_{pom}\,I_{pom} - No_{pom} - I_{pom}\,[2 + I_{pom}\,R_{pom}]) + U_{uzb} \cdot i_{uzb_n}$.)

snage, koji želimo, a različitom uzbudom obaju strojeva optok jalove snage, koji želimo. Napose možemo strojeve tjerati uz nominalni faktor snage. Obično se međutim u to ne upuštamo.

Metoda preuzbude i poduzbude kod sinhronih strojeva. Priključimo li sinhroni stroj sam kao motor u praznom hodu na mrežu nominalne frekvencije i nominalnog napona, te ga preuzbudom ili poduzbudom prisilimo da daje ili uzima jalovu struju veličine nominalne struje, dobivamo praktički pune gubitke u željezu, gubitke trenja, gubitke u bakru i dodatne gubitke kao kod nominalnog pogona. Stvarno su gubici u željezu u prvom slučaju (preuzbuda) nešto preveliki, a u drugom slučaju (poduzbuda) nešto premaleni. Uzmemo li srednju vrijednost jedne i druge snage, što ih stroj uzima iz mreže, možemo uzeti, da je ova vrijednost, povećana za faktične

uzbudne gubitke kod nominalnog rada, jednaka ukupnim gubicima sinhronog stroja, te možemo odavle odrediti korisnost. Svakako treba međutim ocijeniti pogreške, koje nastaju zbog upotrebe mjernih transformatora i instrumenata, te mogu procentualno jako utjecati na rezultat, jer cos φ kod ovih pokusa leži između 0,02 kod sasvim velikih i 0,06 kod srednjih strojeva. Kod ovih malih faktora snage zamjetljive su već kutne griješke mjernih transformatora. Stoga ovu metodu, koja se sama po sebi pričinja kao da zahtijeva najmanje sredstava, u praksi tek rijetko primjenjujemo.

Metoda pojedinačnih gubitaka. Najvažniji način određivanja korisnosti kod strojeva gotovo svih vrsta je računsko određivanje na temelju pojedinačnih gubitaka, koji nastaju u stroju. Ove možemo podijeliti na tri glavne grupe: uže gubitke praznog hoda, uzbudne gubitke i teretne gubitke, u koje su uključeni i dodatni gubici.

Gubici praznog hoda obuhvaćaju gubitke u željezu kod praznog hoda i gubitke trenja. U gubitke u željezu ubrajamo prije svega prave gubitke u aktivnom željezu zbog premagnetiziranja i zbog vrtložnih struja. Osim toga spadaju ovamo svi ostali gubici, koji nastaju u stroju, što ide neopterećen pod naponom, dakle u tlačnim pločama, u izolaciji, u površini polnih nastavaka, u kratko spojenim kavezima i prigušnim namotima i u svim dijelovima, na koje djeluje rasipno polje. Gubici trenja nastaju u ležajima, u prislonjenim četkicama, te zbog trenja zraka na svim dijelovima, koji se gibaju.

Uzbudni gubici su gubici strujne topline u namotima poredne i nezavisne uzbude na glavnim polovima, kao i gubici prijelaza u slučaju, da te namote pojimo preko kliznih koluta. Prema propisima (REM) treba ovdje uzeti u obzir i gubitke u pripadnim otpornicima za regulaciju, i u prigrađenim uzbudnicima.

Teretni gubici nastaju kao gubici strujne topline u namotima armature, u svicima pomoćnih polova i serijskim svicima, i kao gubici prijelaza na kolektoru ili na kliznim kolutima, preko kojih teče struja opterećenja. Kao *dodatne gubitke*, pod kojima razumijevamo sve ostale gubitke, promatramo gubitke vrtložnih struja u izmjeničnim i istosmjernim namotima armature, te gubitke, koji dodatno nastaju u željezu, u konstrukcionim dijelovima i u prigušnom kavezu, kad u stroju teče struja.

Zbroj ovih gubitaka daje ukupne gubitke stroja, dakle razliku između korisno upotrebljene i ukupno dovedene snage. Korisnost računski određena iz pojedinačnih gubitaka iznosi dakle:

$$\eta = \frac{\text{predana snaga}}{\text{predana snaga} + (\text{uži gubici praznog hoda} + \text{gubici uzbude} + \text{teretni gubici} + \text{dodatni gubici})}$$

odnosno

$$\eta = \frac{\text{dovedena snaga} - (\text{uži gubici praznog hoda} + \text{gubici uzbude} + \text{teretni gubici} + \text{dodatni gubici})}{\text{dovedena snaga}}.$$

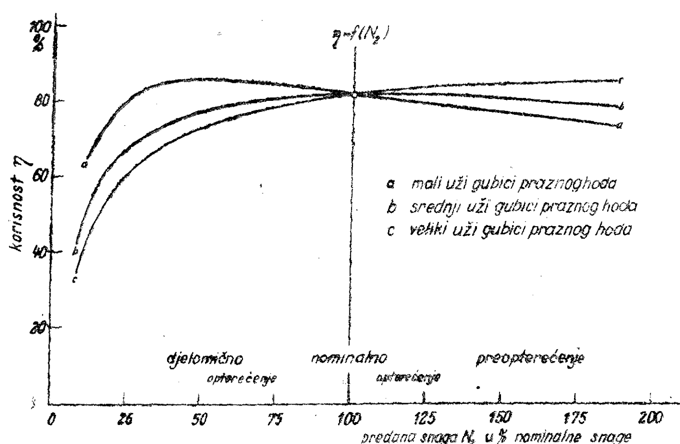
Gubitke određujemo u pokusu praznog hoda i djelomično u pokusu kratkog spoja. Kod toga polazimo od osnovne pretpostavke, da u praznom hodu ne nastaju nikakvi teretni gubici, osim većinom neznatnih gubitaka strujne topline zbog struje praznog hoda, dok naprotiv imamo potpune uže gubitke praznog hoda, te da u kratkom spoju uz gubitke trenja nastaju samo teretni gubici i dodatni gubici, dok su pravi gubici u željezu tako maleni, da se ne moramo na njih obazirati. Gubitke uzbude dobivamo računski kao produkt uzbudne struje i uzbudnog napona, uzimajući u obzir gubitke, koji još povrh toga nastaju neposredno u uzbudnom krugu. Same gubitke u bakru računamo kao I^2R. Dodatne gubitke odredujemo — i to samo kod sinhronih strojeva, zakretnih transformatora i transformatora — u kratkom spoju. Kod svih ostalih strojeva zadovoljavamo se, u pomanjkanju jednostavne i pouzdane metode mjerenja, propisima (REM) određenim postotkom električke snage pretvorene u nominalnom pogonu, dakle kod generatora proizvedene snage, a kod motora dovedene snage. Kod pretvarača računamo sa snagom predanom na istosmjernoj strani. Ovako određeni dodatni gubici vrijede kod nominalne struje, te ih kvadratično preračunavamo na druge struje. Vrijede ovi postoci:

istosmjerni strojevi, kompenzirani	0,5%
istosmjerni strojevi, nekompenzirani	1,0%
asinhroni motori	0,5%
jednoarmaturni pretvarači	0,5%
kaskadni pretvarači	1,0%

To su dakle dogovorene vrijednosti, koje stvarno mogu biti veće ili manje, prema izvedbi i veličini stroja.

Krivulja korisnosti. Korisnost koju smo izračunali za pojedine točke opterećenja prikazujemo u obliku krivulje korisnosti u ovisnosti o dovedenoj snazi, ili u ovisnosti o predanoj snazi, ili — kod motora s regulacijom — u zavisnosti o zakretnom momentu, što ga stroj daje. Ove η-krivulje pokazuju tri tipična oblika, koji zavise o raspodjeli gubitaka na one uglavnom nezavisne o opterećenju i zavisne o njemu. U onaj dio, koji zavisi o opterećenju spadaju u prvom redu teretni gubici, te dalje dodatni gubici i onaj dio uzbudnih gubitaka, koji treba dodati kod opterećenog stroja uzbudnim gubicima u praznom hodu. U prvom približenju možemo ove gubitke smatrati kvadratično zavisnima o opterećenju. U gubitke nezavisne o opterećenju spadaju svi ostali; dakle gubici trenja, gubici u željezu, i uzbudni gu-

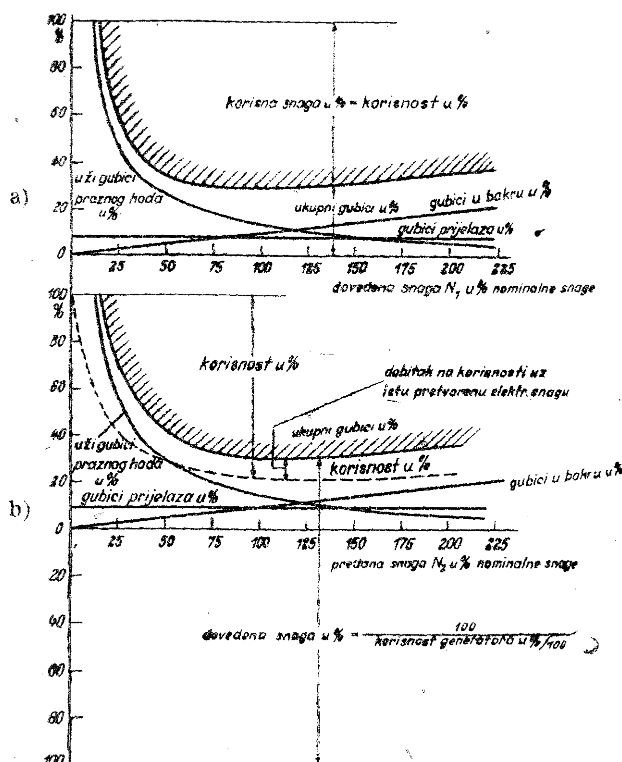
bici u praznom hodu. Na sl. 20 prikazane su krivulje korisnosti uz iste ukupne gubitke kod 100% opterećenja, kako ih dobivamo za tri tipična slučaja: pretežno gubici zavisni o opterećenju, jednaki gubici zavisni i gubici nezavisni o opterećenju, i pretežno gubici nezavisni o opterećenju kod nominalnog opterećenja. U prvom slučaju korisnost pokazuje maksimum kod djelomičnog opterećenja, u drugom slučaju kod punog opterećenja i napokon kod preopterećenja. Uz poznatu raspodjelu gubitaka možemo dakle zamisliti tok krivulje, i obrnuto, gledajući gotovu krivulju dobivamo sliku o raspodjeli gubitaka.



Sl. 20. Krivulje korisnosti uz različitu podjelu istih ukupnih gubitaka kod punog opterećenja. Uži gubici praznog hoda kod krivulje a: ¼, kod krivulje b: ½, kod krivulje c: ¾ ukupnih gubitaka kod punog opterećenja.

Dublji uvid u tok krivulja korisnosti dobivamo, ako zasebno uzmemo u obzir procentualni utjecaj užih gubitaka praznog hoda, gubitaka prijelaza i gubitaka opterećenja. To je moguće kod svih strojeva, kod kojih je električki pretvorena snaga, dakle kod motora dovedena, a kod generatora predana proporcionalna sa strujom. To je slučaj kod istosmjernih i sinhronih strojeva, a uz stanovito približenje i kod asinhronih strojeva. Kao gubitke prijelaza uzimamo sve one, koji zavise linearno o struji, dakle na pr. jedan dio uzbudnih gubitaka koji nastaju kod opterećenja. Nanesemo li, kao na sl. 21a i b, tri grupe gubitaka u postocima pripadne električki pretvorene snage, dobivamo za uže gubitke praznog hoda hiperbolu, za gubitke prijelaza paralelu s nul-linijom, a za gubitke u bakru pravac kroz nul-točku. Suma svih triju krivulja predstavlja ukupne procentualne gubitke. Ovi dakle pokazuju minimum, i to kod onog opterećenja, gdje se uži gubici praznog hoda i teretni gubici sijeku. Kod motora predstavlja već krivulja ukupnih gubitaka neposredno tok korisnosti, ako odaberemo kao nul-liniju hori-

zontalu kroz točku 100% na ordinati. Kod generatora dobivamo, kao što se vidi na slici, neposredno jedino recipročnu vrijednost korisnosti, dakle vrijednost 1/(korisnost generatora), iz koje možemo lako odrediti stvarnu



Sl. 21. a i b Procentualno sudjelovanje užih gubitaka praznog hoda, gubitaka prijelaza i gubitaka u bakru u ukupnim gubicima u zavisnosti o električki pretvorenoj snazi kod motora (a) i generatora (b), ako je ova proporcionalna sa strujom.

krivulju. Vidimo također, kako jedan te isti stroj uz istu pretvorenu snagu ima veću korisnost kao generator u usporedbi s motorskim radom.

K. METODE OPTEREĆENJA

Električke strojeve opterećujemo kod ispitivanja po mogućnosti potpuno, te ih tjeramo onako, kako odgovara njihovoj kasnijoj upotrebi. Generator spojimo tako, da daje struju, a motor upotrebljavamo, da tjera stroj za opterećenje ili kočnicu. U tu svrhu moramo *generator* tjerati putem remena ili spojke motorom ispitne stanice, koji odgovara njegovoj snazi. Kao potrošači struje služe ili mirujući otpornici, ili mreža, sposobna da tu struju

primi i koja nam je pri ruci, ili koju napravimo posebnim pretvaračem ispitne stanice. Kao otpornike kod manjih snaga do cca 80 kW upotrebljavamo spirale od žice, koje su pričvršćene tako, da slobodno vise u željeznom okviru. S pomoću zgodno smještenih sklopki možemo iznos otpora mijenjati u širokim granicama spajanjem pojedinih grupa u seriju ili paralelno, te ga prilagoditi naponu i struji generatora. Za veće snage do nekoliko stotina kW upotrebljavamo vodene otpornike, kod kojih možemo regulirati dotok. Ovi se u bitnosti sastoje od posude za vodu, u koju je uronjeno više elektroda, kojima možemo regulirati visinu. Mali dodatak sode smanjuje otpor tekućine, no često nije ni potreban. Toplina, koja se stvara kod prolaza struje, zagrijava i isparuje jedan dio vode. Ovaj opet nadoknađujemo dotokom, koji možemo regulirati. Kod upotrebe vodenih otpornika treba paziti na neke mjere opreznosti: posudu i dovode ne smijemo u pogonu doticati. Elektrode moraju biti tako konstruirane, da se ne mogu jedna drugoj približiti ili čak dodirnuti. Kod ispitivanja na generatorima višeg napona ne smijemo elektrode izvaditi do samog njihova donjeg ruba da bismo postigli pravi otpor opterećenja. U tom slučaju postoji opasnost, da se tik iznad površine proširi luk, koji može dovesti do požara na susjednim dijelovima. Dotok vode moramo udesiti prije početka ispitivanja, te ga treba za vrijeme pokusa nadgledati.

Veće snage generatora vraćamo gotovo isključivo u mrežu. Ovaj postupak primjenjujemo kod ispitivanja trajnog rada iz čisto ekonomskih razloga čak i kod manjih snaga, ispod 100 kW. Zbog zgodnije regulacije za vrijeme snimanja opterećenja opterećujemo često stroj na otpornike, te ga preklopimo tek kod trajnog rada na mrežu.

Motori tjeraju kod opterećenja strojeve ispitne stanice, koji opet rade kao generatori na otpornike ili na mrežu. Zbog svestrane mogućnosti upotrebe, gotovo svi strojevi ispitne stanice su istosmjerni poredni strojevi. Kao takvi mogu jednako poslužiti za opterećenje motora i za pogon generatora unutar širokog područja brzine vrtnje. Da bismo bolje uskladili snagu i brzinu vrtnje, spajamo ispitivane motore do srednjih snaga sa strojem ispitne stanice obično putem remena. Direktno spajanje, koje zahtijeva više posla, primjenjujemo kod brzih motora i kod većih motora iznad 100 kW. Dajemo mu prednost kod izvođenja pokusa zaleta ili zaustavljanja.

Ako ispitujemo više jednakih strojeva, možemo ih često međusobno opterećivati u povratnom radu. Jedan stroj radi kao motor i tjera drugi, koji radi kao generator te vraća motoru električku snagu, koju proizvodi. Za pokrivanje gubitaka upotrebljavamo mrežu ili mali dodatni mehanički pogon. Opširniji opis ove metode povratnog rada nalazi se u I. dijelu pod I.

Čisto mehaničko opterećenje motora bilo kakvim *kočnicama*, dakle t. zv. kočenje, u praksi električkih ispitnih stanica daleko zaostaje za opterećenjem generatorima. Tek rijetko nalazimo još u ispitnim stanicama Pro-

nyjevu kočnicu i vodnu vrtložnu kočnicu. Obje rade na istom principu. Suhim trenjem ili trenjem u tekućini kočimo tijelo, koje je nataknuto na osovinu stroja. Kod toga možemo utegom ili vagom odrediti kočni moment na kraju poluge, koja je spojena s mirnim dijelom kočnice. Iz relacije:

$$\text{snaga u kW} = \frac{\text{zakretni moment u mkg} \cdot \text{brzina vrtnje u okr/min}}{973},$$

$$\left(973 = \frac{60000}{2\pi \cdot 9{,}81}\right)$$

uz poznatu brzinu vrtnje neposredno dobivamo snagu, koju daje motor. Kako se ova pretvara u toplinu, koju rashladna voda mora odvesti iz kočnice, treba čitav uređaj snabdjeti dotokom i otokom vode.

Kočnu snagu reguliramo kod Pronyjeve kočnice jačim ili slabijim pritezanjem, a kod vodne vrtložne kočnice promjenom količine vode u unutrašnjosti kočnice. Uz razmjerno jednostavan sastav, pregledan način rada i mali potreban prostor ima tu i slabih strana. Prijeko potreban priključak na vodu, otôk, koji je često teško izvesti i nedovoljno fina mogućnost regulacije, istisnuli su ove kočnice čak i kod manjih snaga gotovo potpuno iz električkih ispitnih stanica. Kako nije moguće korisno dobiti natrag snagu, koju daje kočeni motor, to ih kod ispitivanja većih elektromotora danas uopće više ne upotrebljavamo.

L. DINAMO-VAGA

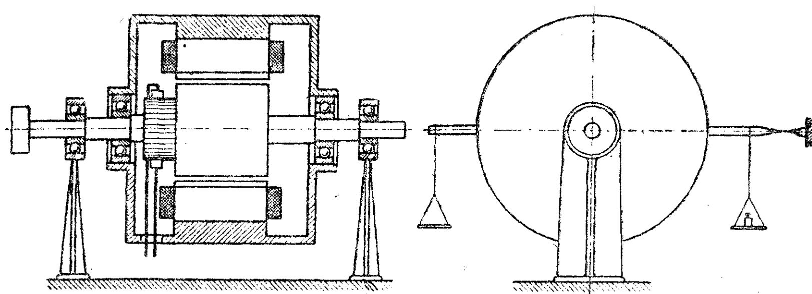
Kao stroj ispitne stanice sve više upotrebljavamo dinamo-vagu, koja sjedinjuje prednosti električkih strojeva za opterećenje s onima mehaničkih kočnica, naime ponovno dobivanje energije s lakim i pouzdanim određivanjem zakretnog momenta. Možemo je upotrebiti za pogon i za opterećenje. Imenom dinamo-vaga, elektrostrojna vaga ili kočni dinamo za vaganje označujemo svaki onaj stroj za ispitivanje, koji — uz inače sasvim normalni električki sastav istosmjernog ili izmjeničnog stroja — ima i kućište vrtivo u ležajima. Ovi nam strojevi omogućuju da na najjednostavniji i vrlo točan način mjerimo zakretni moment, koji dovodimo njihovoj osovini ili ga ona daje. Određujemo ga točno kao kod mehaničkih kočnica utezima ili vagom na kraju poluge, koja je pričvršćena na kućište. Težina u kg pomnožena s krakom poluge u m daje kod vodoravnog položaja poluge i vertikalnog smjera sile zakretni moment u mkg. Snagu određujemo kao gore: snaga u kW = zakretni moment puta brzina vrtnje podijeljeno sa 973.

Iz dalje navedenih razloga pridolazi mjerenoj sili još mala vrijednost korekcije, koja zavisi samo o brzini vrtnje te je odredimo kod jednog jedinog baždarenja dinamo-vage. Prikazujemo je u tabeli ili u krivulji korekcije.

Način rada dinamo-vage osniva se na uzajamnom djelovanju sila između rotora i statora električkih strojeva. Ide li na pr. stroj kao motor, te

tjera radni stroj zakretnim momentom od 100 mkg, to će isto toliki zakretni moment djelovati u obrnutom smjeru na stator. Normalno se ovaj moment prenosi temeljnim vijcima na podnožje, te nije pristupačan opažanju, a pogotovo mjerenju. Ako pak nema krutog pričvršćenja kućišta, nego je ovo namjesto toga vrtivo smješteno u ležajima, nastoji kućište opterećenog stroja da se zakrene, i to nasuprot smjeru vrtnje armature kod motorskog, a u smjeru vrtnje kod generatorskog pogona. Lako ćemo zapamtiti: rotor motora odbija svoje kućište natrag, rotor generatora vuče kućište sobom. Ako kućište opremimo vodoravnim polugama, možemo silama, koje na njega djeluju u ispravnom smjeru, bilo utezima, bilo protupritiskom vage, upravo izbjeći, da se kućište zakrene. Kod premale sile zakrenut će se u jednom, kod prevelike sile u drugom smjeru. Graničnici ograničuju zakret u oba smjera. Kad je ispravno izvagano, kućište stoji u ravnoteži, te možemo očitati zakretni moment.

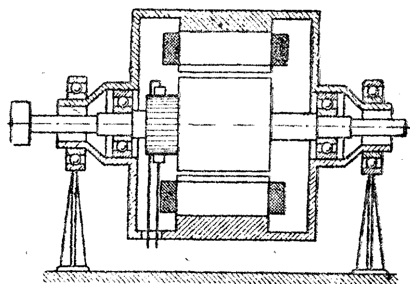
Principijelni sastav starije istosmjerne dinamo-vage prikazan je na sl. 22. Osovina rotora vrti se u oba vanjska ležaja, koji su čvrsto spojeni s



Sl. 22. Dinamo-vaga starije izvedbe. (Osovina se vrti u čvrstim ležajima)

temeljnom pločom. Kućište se može na dva daljnja ležaja slobodno okretati na osovini, koja miruje ili se vrti. Kazaljka na kućištu i protuznačka pričvršćena na temeljnoj ploči određuju nul-položaj, koji treba točnim vaganjem udesiti.

Kod novijih izvedaba, prema sl. 23, otpadaju oba vanjska ležaja. Osovina se vrti u normalno smještenim ležajima u kućištu, a samo se kućište vrti u posebnim ležajima, postavljenim na temeljnu ploču. Na taj smo način izbjegli trenje između osovine i čvrstih ležaja, koje kod određivanja zakretnog momenta na kućištu nismo mogli neposredno obuhvatiti. Gotovo sve sile prelaze preko kućišta. Izostaju jedino neznatne sile, kojima djeluje



Sl. 23. Dinamo-vaga novije izvedbe. (Osovina se vrti u ležajima u kućištu)

jedan dio struje ulaznog i izlaznog rashladnog zraka na stator. Ove uzimamo u obzir korekcijom. Zbog momenata trenja mirovanja čvrsti ležaji kućišta uzrokuju stanovitu neosjetljivost reagiranja, koja se znatno smanjuje, kad stroj ide, i to zbog neprestanih neznatnih vibracija kućišta. Prednosti novije izvedbe, koje se dakle sastoje u znatnom smanjenju korekcionih vrijednosti, izjednačuju ovu malu manu.

Dinamo-vagu hladimo bilo vlastitim ventilatorom, bilo pridodanim stranim ventilatorom kod šireg opsega regulacije. Zrak vodimo tako, da struja zraka po mogućnosti aksijalno ulazi i izlazi. To pridonosi daljnjem smanjenju korekcije. Kod baždarenja dinamo-vage obuhvaćamo nepoželjne zakretne momente.

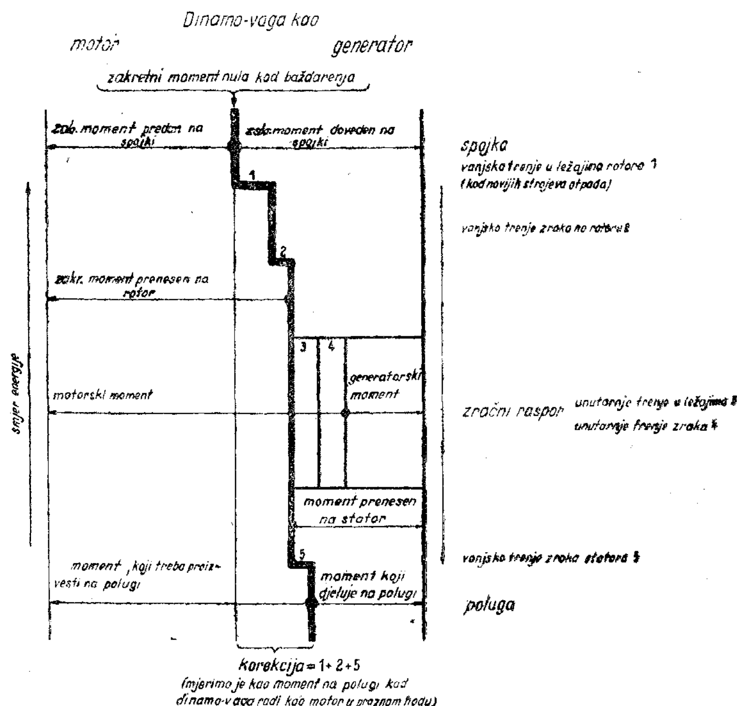
Čvrsto prigrađeni tahometri i automatske vage, koji na velikim skalama pokazuju brzinu vrtnje i zakretni moment u mkg, usavršavaju gdjekada opremu dinamo-vage. Brojila okretaja u vezi sa stop-urom omogućuju nam najtočnije određivanje brzine vrtnje.

Snimanje karakteristika opterećenja. Dinamo-vaga je najprikladniji ispitni stroj za sve motore, koji rade u širokom području regulacije brzine vrtnje, te ih treba unutar ovoga ispitati. Ovamo spadaju mnogi istosmjerni motori, kao i sve vrste izmjeničnih kolektorskih strojeva. Dok bismo se kod prvih lakše mogli odreći snimanja *mnogih karakteristika opterećenja* u zahtijevanom području regulacije, jer točke opterećenja možemo bez velikih sredstava odrediti računski ili grafički, dotle su kod ispitivanja izmjeničnih motora prilike teže. Samo s mukom i znatno manjom točnošću možemo odrediti ponašanje između praznog hoda i kratkog spoja na osnovu predračuna ili jednostavnih rezultata mjerenja. Uvijek se preporučuje neposredno mjerenje. Zbog njihova posebnog načina rada možemo kod ovih strojeva često utjecati na njihove karakteristike. Stoga je zadatak ispitivanja da kod novog udešavanja stroja postigne iste karakteristike opterećenja. Često tražimo kod motora s regulacijom, da opterećenje u zavisnosti o brzini vrtnje slijedi određeni zakon, bilo da zakretni moment ostaje konstantan, bilo da raste linearno ili kvadratično s brzinom vrtnje. Ispitivanje ovakvih radnih karakteristika normalnim ispitnim strojevima, pa bili oni i baždareni, nezgodno je, ono zahtijeva mnogo vremena i ne može se uvijek provesti bez pogrešaka. Kod upotrebe dinamo-vage sastavimo prije početka ispitivanja tabelu, u koju unesemo za pojedine brzine vrtnje pripadne zakretne momente. Zatim ispitivani stroj potjeramo, reguliramo na pojedine brzine i opteretimo momentom, koji smo uzeli iz tabele. Na taj način dobivamo brzo krivulju punog opterećenja, a ako treba i krivulje djelomičnih opterećenja. Svako preračunavanje, koje bi bilo potrebno, kad vrijednosti opterećenja ne bi održavali točno, otpada. Ove prednosti dovode do široke primjene dinamo-vage i kod ispitivanja drugih motora.

Određivanje korisnosti. Osim za snimanje karakteristika opterećenja dinamo-vagu vrlo često upotrebljavamo za neposredno određivanje korisnosti ispitivanog stroja. To osobito vrijedi za izmjenične kolektorske strojeve, kod kojih su druga određivanja korisnosti u praksi potpuno potisnuta. Uz točno poznavanje momenta na spojci i brzine vrtnje točno je određena vrijednost predane ili dovedene snage ispitivanog stroja. Električki pretvorenu snagu možemo kod svih strojeva vrlo točno izmjeriti mjernim instrumentima ugrađenim u dovode do mreže. Odnos obiju snaga daje nam korisnost, i to točnošću, koja odgovara točnosti pojedinih mjerenja. Kako se određivanje momenta svodi na mjerenje dužine i težine, možemo ga vrlo točno izvesti. Pogreška ne će prelaziti vrijednost od cca 0,1%. Određivanje brzine vrtnje znatno je manje točno, ako ga izvodimo tahometrom. Čak i dobri instrumenti rade s pogreškom od ± 0,5%. Uz upotrebu brojila okretaja, koje ne preskače — ovo se događa doduše jedino kod nepažljiva držanja i prevelikih brzina vrtnje — možemo određivanje brzine s pomoću dobre stop-ure smatrati gotovo posve točnim. Osjetljivost reagiranja dinamo-vage kreće se oko 0,2% punog zakretnog momenta. Korekcione vrijednosti treba uzeti u obzir. Izmjerimo ih kod baždarenja, te se kod strojeva novije izvedbe tokom vremena ne mijenjaju. Ako uzmemo u obzir ove pogreške, možemo kod pomnih mjerenja očekivati određivanje snaga s ukupnom pogreškom manjom od 1,0%. Korisnost određujemo dakle direktnim mjerenjem s točnošću od ± 1,0%.

Određivanje korekcionog momenta dinamo-vage. Na sl. 24. vidimo u shematskom prikazu zakretne momente, koji uvjetuju korekciju. Oni potječu isključivo od onih sila, koje izvana djeluju bilo samo na osovinu i rotor, bilo samo na stator. Sve sile između rotora i osovine s jedne strane, i statora s druge strane obuhvaćamo, naprotiv, kod vaganja na statoru. Na osovinu djeluju sile trenja vanjskih čvrstih ležaja kod starije izvedbe prema sl. 22. i sile trenja zahvaćenog zraka. Na rotor ne djeluju kod potpuno zatvorenog stroja uopće nikakve vanjske sile. Kod otvorenog stroja dolazi ipak do trenja s vanjskim zrakom, no ovo je tek vrlo mali dio ukupnog trenja zraka na dijelovima, koji se gibaju. Najveći dio momenata, koji nastaju zbog vrtloženja zraka unutar stroja, prenosi se na stator, te se očituje jedino u osnovnom opterećenju stroja, koje možemo izmjeriti. To znači, da kočnica ne može raditi potpuno rasterećena, pa ni u slučaju da uzbudnu struju udesimo na nulu. Kao vanjske sile djeluju na kućište prije svega neizbalansiranosti. Ove izjednačimo unaprijed protuutezima. Nadalje može struja zraka prigrađenog stranog ventilatora izazvati tangencijalne vanjske sile, koje treba obuhvatiti korekcijom. Treće, kod novije izvedbe, prema sl. 23., pridolazi trenje ležaja kućišta. Ne možemo ga obuhvatiti korekcijom, jer smjer ovih sila trenja nije određen. Ono određuje stupanj netočnosti očitanja. Određivanje korekcionih momenata osniva se na slije-

dećem razmatranju. Ako je dinamo-vaga priključena kao motor u praznom hodu na mrežu bilo kojeg napona, mora zakretni moment, što ga on daje na svojoj slobodnoj spojci, biti očito jednak nuli, jer nije priključen nikakav potrošač mehaničke energije. Unatoč tome daje kućište kod tog pokusa otklon, te ga možemo tek dodavanjem utega na jednoj ili drugoj strani dovesti u nul-položaj. Ovaj zakretni moment treba sada tako korigirati, da



Sl. 24 Tok zakretnog momenta u dinamo-vagi

$M_{spojke} = M_{poluge} + K$ **kod generatorskog pogona**

$M_{spojke} = M_{poluge} - K$ **kod motorskog pogona**

K = **korekcioni moment**

bude jednak nuli. Stoga je korekcioni moment jednako velik, ali je suprotnog predznaka. Baždarenje se dakle sastoji od izvođenja praznog hoda u motorskom radu kod različitih brzina vrtnje. Kod svake brzine vrtnje odredimo moment $M_0 = K$ u mkg, koji je potreban, da kućište dovede u ravnotežu. Označujemo ga pozitivnim, kad bi se kućište jedino zbog njegova djelovanja zakrenulo u smjeru vrtnje rotora. Nazivamo ga negativnim, kad bi — ako ga zamislimo, da djeluje sam — zakrenuo stator nasuprot smjeru vrtnje armature. (Negativne vrijednosti za korekciju K dobivamo u slučaju, koji u praksi gotovo nikada ne nastupa, kad je jednostrani pritisak zraka stranog ventilatora veći od zakretnih momenata gubitaka, koji izvana

djeluju na armaturu, te kad djeluje u suprotnom smjeru od ovih). Kako vrijednost korekcije za oba smjera vrtnje može u principu biti različita, treba pokus praznog hoda izvesti za oba smjera vrtnje, te zasebno prikazati K_{desno} i K_{lijevo} u zavisnosti o brzini vrtnje na desno, odnosno na lijevo.

Radi li dinamo-vaga kao motor, bit će stvarni moment, što ga daje na spojci:

$M_{spojka} = M_{poluga} - K$ (dinamo-vaga goni),

a u slučaju da radi kao generator, bit će mu vrijednost:

$M_{spojka} = M_{poluga} + K$ (dinamo-vagu gonimo).

Lako ćemo zapamtiti slijedeće pravilo, koje vrijedi za pozitivne korekcione vrijednosti, dakle za većinu slučajeva:

Zakretni momenti, mjereni dinamo-vagom, mijenjaju se zbog korekcije tako, da za korisnost ispitivanog stroja izlaze veće vrijednosti. Ako korekciju ne uzmemo u obzir, bit će dakle vrijednosti za korisnosti ispitivanih strojeva, motora ili generatora, premalene.

Formule za korisnost glase:

kod ispitivanja motora $\eta\,\% = 102{,}7 \dfrac{(M + K) \cdot n}{N_1}$,

kod ispitivanja generatora $\eta\,\% = 97{,}3 \dfrac{N_2}{(M - K) \cdot n}$,

gdje je

M = mjereni zakretni moment na kućištu u mkg,
K = korekcija u mkg,
n = mjerena brzina vrtnje u okr/min,
N_1 = dovedena snaga u W,
N_2 = predana snaga u W,
$\eta\%$ = korisnost u %,

$$102{,}7 = \frac{9{,}81\,\pi}{30} \cdot 100,$$

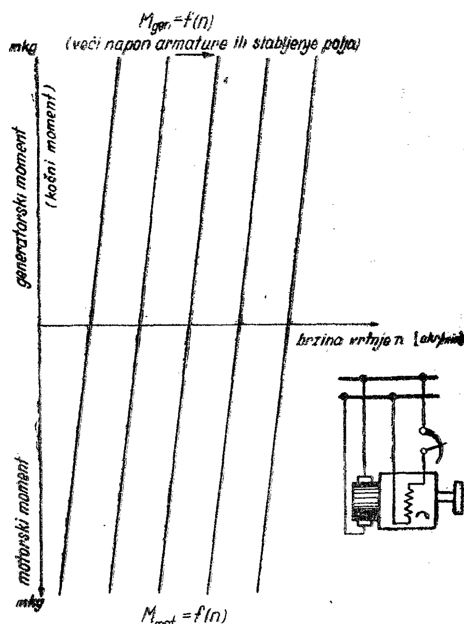
$$97{,}3 = \frac{30}{9{,}81\,\pi} \cdot 100.$$

M. KARAKTERISTIKE ZAKRETNOG MOMENTA U ZAVISNOSTI O BRZINI VRTNJE STROJEVA ZA POGON I ZA OPTEREĆENJE

Kod ispitivanja električkih strojeva opažamo pojavu, da kod jednog rasporeda možemo opterećenje udesiti brzo i sigurno, dok kod drugih metoda često tek strpljivim i pomnim reguliranjem amo-tamo na uzbudnim otpornicima uspijevamo točno udesiti vrijednosti koje želimo. Ovakvo nesigurno ponašanje strojeva osobito je nesnosno kod očitavanja mnogih instrumenata, jer za vrijeme očitavanja, koje duže traje, može već doći do

znatnih promjena u opterećenju. Uzrok ovim pojavama postaje jasan, ako ispitamo karakteristike opterećenja kako ispitivana stroja, tako i stroja ispitne stanice. Najbolje je da pođemo od karakteristika zakretnog momenta u zavisnosti o brzini vrtnje, te da istražimo koliko utječu male promjene brzine vrtnje, napona mreže ili uzbudne struje.

Istosmjerni stroj. Prije svega ispitajmo istosmjerni stroj s nezavisnom uzbudom, kao najvažniji stroj ispitne stanice. On radi kao motor ili generator, priključen na mrežu ili kao generator na otpornike. Kod priključka na mrežu odgovara brzini vrtnje praznog hoda zakretni moment nula. Ako ga opteretimo kao motor, brzina vrtnje nešto pada, kad zakretni moment raste. Slabljenjem polja ili povećanjem napona mreže možemo točku praznog hoda, a s ovom i krivulju zakretnog momenta pomaknuti na vrijednosti veće brzine vrtnje. Uglavnom uzevši, ove su linije međusobno paralelne.



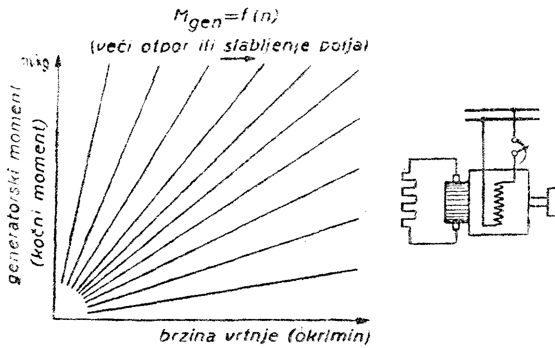
Sl. 25. Karakteristike zakretnog momenta istosmjernog stroja na mreži

Ako isti stroj treba da radi kao generator na mrežu, moramo brzinu vrtnje povećati preko brzine praznog hoda. Kad zakretni moment generatora raste, povećava se nešto i brzina vrtnje. Karakteristike zakretnog momenta u ovisnosti o brzini vrtnje predstavljaju produženje motorskih karakteristika. I jedne i druge su prikazane zajedno na sl. 25. Osobito treba upozoriti na to, da karakteristike moraju sasvim općenito teći, kako su prikazane, t. j. da brzina vrtnje motora pada kad opterećenje raste, i da brzina generatora kod opterećenja raste. Što strmije su karakteristike, to tvrđe radi stroj. Ako su manje strme, govorimo o mekom stroju. Tvrdi stroj odgovara na najmanje promjene brzine vrtnje, napona mreže ili uzbudne struje jakim promjenama opterećenja, dok je meki stroj znatno manje osjetljiv. Zakretanjem nosača četkica možemo u određenim granicama udešavati stupanj tvrdoće. Kako za motorski, tako i za generatorski rad vrijedi pravilo:

Pomak četkica *u* smjeru vrtnje armature čini stroj *mekšim*,
pomak četkica *nasuprot* smjeru vrtnje čini ga *tvrđim*.

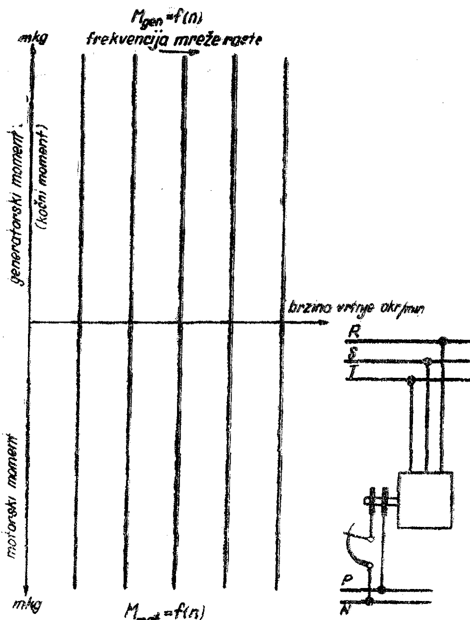
Kako pretvrdi rad stroja može predstavljati opasnost, pomičemo kod strojeva ispitne stanice nosač četkica uvijek nešto u smjeru vrtnje. Kod

tvrda stroja, gdje dakle nosač stoji u neutralnom položaju, ili bismo ga čak pomaknuli natrag, opasnost je kod motora u tome, što je sklon da pobjegne, a kod generatora, što je sklon da preuzme preveliko opterećenje.



Sl. 26. Karakteristike zakretnog momenta istosmjernog stroja opterećenog na otpornike.

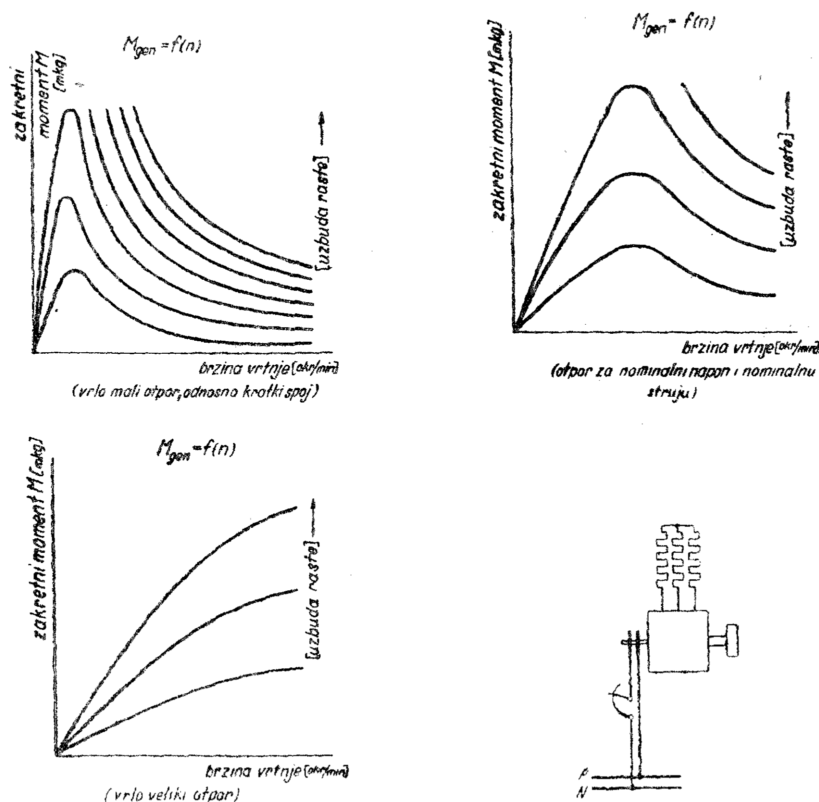
Karakteristike zakretnog momenta u zavisnosti o brzini vrtnje istosmjernog generatora, koji je priključen na otpornike kao potrošače, pokazuju iz osnova drugačiji izgled. Uz konstantnu uzbudnu struju, napon, a s njime i struja armature, rastu proporcionalno s brzinom vrtnje. Zakretni moment, koji uz konstantni tok zavisi jedino o struji, rast će dakle također s brzinom vrtnje. Krivulja zakretni moment-brzina vrtnje bit će dakle pravac kroz ishodište (sl. 26). Njegov nagib zavisi o veličini otpora za opterećenje i o veličini uzbudne struje. Povećana uzbudna ili smanjeni otpor čine karakteristike strmijima. Kod slabe uzbude i velikih otpora za opterećenje one su položitije. Razabiramo, da mala promjena uzbudne struje ili brzine vrtnje uzrokuje tek malu promjenu zakretnog momenta, dakle da generator u ovom spoju radi vrlo mekano u usporedbi s radom na mrežu. Time postaje jasno, zašto se tako rado služimo metodom opterećenja na otpornike.



Sl. 27. Karakteristike zakretnog momenta sinhronog stroja na mreži

Sinhroni stroj, koji tek u maloj mjeri upotrebljavamo kao stroj za ispitivanje kod različitih brzina vrtnje, ima posve drugačije karakteristike.

Ako radi kao motor ili generator na mrežu, karakteristika zakretnog momenta je vertikala kroz točku sinhrone brzine vrtnje (sl. 27). Opterećujemo li, naprotiv, sinhroni stroj na otpornike, krivulja se bitno mijenja. Kod posve malih brzina vrijede još ista razmatranja, kao kod istosmjernog stroja. Napon, struja, a zbog toga i zakretni moment rastu linearno s brzinom vrtnje. Uzbudna struja i otpor opterećenja utječu u početku na nagib krivulje zakretnog momenta u zavisnosti o brzini vrtnje isto kao kod istosmjernog generatora. Reakcija struje armature na polje, koja nastaje kod sinhronih strojeva, slabi polje sve više, kad brzina vrtnje raste. To dovodi do ponovnog opadanja zakretnog momenta, nakon što je dosegao maksimalnu vrijednost, ma da struja armature raste. Sl. 28 prikazuje karakte-

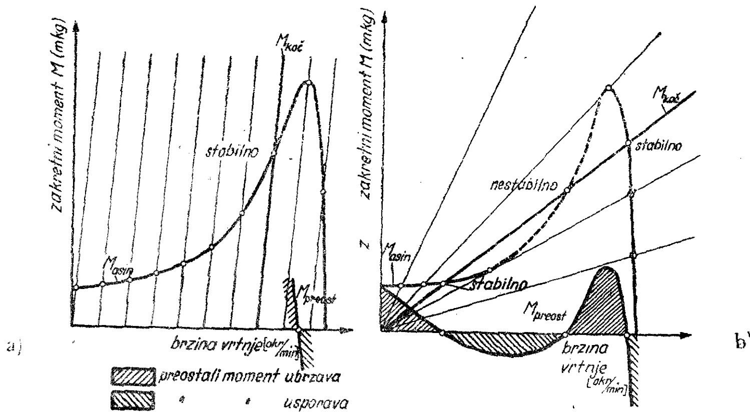


Sl. 28. Karakteristike zakretnog momenta sinhronog stroja opterećenog na otpornike

ristike uz različito velike otpore opterećenja i različite uzbudne struje. Maksimalni moment nastupa većinom ispod upotrebljavanog područja brzine vrtnje, tako da unutar ovoga možemo računati s gotovo konstantnim zakretnim momentom. To je gdjekada velika prednost, jer kolebanja brzine vrtnje praktički uopće ne izazivaju promjene zakretnog momenta.

Jedino udešavanje uzbudne struje ili otpora za opterećenje određuje kočni moment. Kod ispitivanja porednih motora s regulacijom brzine sinhroni je stroj, osobito ako je izveden kao dinamo-vaga, zgodan i udoban stroj za opterećenje. Za vrijeme snimanja opterećenja možemo mirno povećavati brzinu vrtnje ispitivana stroja, a da ne moramo istovremeno pažljivo udešavati uzbudu stroja za opterećenje, bez opasnosti, da bi se opterećenje odviše naglo promijenilo.

Stabilnost i nestabilnost. Stabilne radne točke dobivamo kod ispitivanja motora samo tamo, gdje se karakteristike zakretnog momenta motora i generatora, kojim ga opterećujemo sijeku, a osim toga mora kod povećanja brzine vrtnje zakretni moment motora manje porasti od kočnog



Sl. 29. Kočenje asinhronog motora istosmjernim strojem, koji opterećujemo a) na mrežu, b) na otpornike. U slučaju a) možemo stabilno ispitivati čitavu karakteristiku momenta, u slučaju b) samo dio, koji je puno izvučen. Stabilne pogonske točke dobivamo tamo, gdje krivulja preostalog momenta postaje negativna, kad brzina vrtnje raste.

momenta generatora. Općenito dobivamo dakle stabilne točke osobito tamo, gdje karakteristika zakretnog momenta motora pada kad brzina raste. Odredimo li za svaku brzinu vrtnje razliku zakretnog momenta i kočnog momenta i nanesemo je u zavisnosti o brzini vrtnje, sjeći će ova krivulja preostalog momenta apscisu u svim točkama, u kojima je uopće moguće opterećenje. Od ovih točaka možemo međutim smatrati stabilnima samo one, gdje krivulja s povećanjem brzine vrtnje postaje negativna, a prema tome nestabilnima one preostale točke, gdje krivulja postaje opet pozitivna. Na sl. 29 prikazan je praktički važan slučaj ispitivanja asinhronog motora (mogao bi biti i sinhroni motor), za koji treba snimiti krivulju momenta točku po točku. Razabiramo, da je to moguće jedino s pomoću istosmjernog stroja, koji radi na mrežu, jer strojem, koji radi na otpornike ne bismo mogli snimiti velik dio krivulje.

II. DIO

SPECIJALNO ISPITIVANJE STROJEVA

A. TRANSFORMATOR

Općenito. Tehnički transformatori snage služe za transformaciju izmjenične struje određenog napona u isto takvu drugog napona, uz predavanje djelatne i jalove snage iz primarne mreže, koja poji u pojenu sekundarnu mrežu. Transformator se u biti sastoji od aktivne željezne jezgre i na njoj smještenih namota, od kojih primarni namot uzima snagu, a jedan ili više sekundarnih namota predaju snagu potrošaču. Ovdje-ondje predviđeni tercijarni namot, spojen u trokut, služi poboljšanju prilika magnetiziranja, te nema izvoda. Prema spoju razlikujemo obični transformator, koji povezuje dvije mreže bez vodljive veze, i štedni transformator, kod kojega su namoti tako spojeni u seriju, da se pridolazeći primarni napon povećava ili smanjuje za mali iznos sekundarnog napona; nadalje, dodatni transformator, gdje sekundarni napon, većinom uz fazno zakretanje, spajamo u seriju s naponom nekog drugog strujnog kruga, i konačno strujni transformator, koji je jedini serijski uključen u primarnu mrežu. Ovaj poji bilo kakve potrošače zamjetljive snage strujom, koja je proporcionalna primarnoj struji. Prigušnica je građena kao transformator, koji ima samo primarni namot. Izvodi se sa željeznom jezgrom ili bez nje.

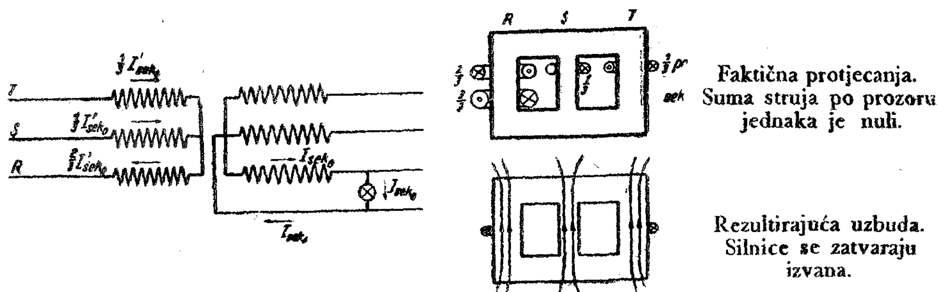
Grupa spoja	Vektorska slika		Slika spoja	
	gornji napon	donji napon	gornji napon	donji napon
A_1				
A_2				
A_3				
B_1				
B_2				
B_3				
C_1				
C_2				
C_3				
D_1				
D_2				
D_3				

Neopterećeni transformator uzima iz mreže malu struju praznog hoda. Njezina jalova komponenta služi za magnetiziranje željeza, a djlatna komponenta pokriva gubitke u željezu i većinom neznatne gubitke praznog hoda u bakru.

Sekundarno opterećeni transformator uzima povećanu primarnu struju iz mreže. Povrh struje praznog hoda, uzima on iz mreže još i struju po iznosu jednaku sekundarnoj struji, preračunatoj na primarnu stranu. Ako pojimo djelatne i induktivne potrošače, smanjit će se kod toga sekundarni napon zbog padova napona na vlastitim djelatnim i induktivnim otporima. Razliku napona izražavamo u postocima sekundarnog napona, i nazivamo je promjenom napona.

U transformatoru, koji je bez otpora kratko spojen, teći će struja kratkog spoja, koja mnogostruko premašuje nominalnu struju, a veličina joj zavisi o veličini djelatnih i rasipnih induktivnih otpora. Ona ne smije prekoračiti 30-struku vrijednost.

U ispitivanje transformatora spada pokus praznog hoda, pokus kratkog spoja, pokus zagrijavanja, ispitivanja električne čvrstoće i računsko određivanje promjene napona i korisnosti. Kontrolu ispravne grupe spoja vršimo mjerenjem međusobnih napona između primarne i sekundarne strane, koje smo jednopolno povezali. Pokuse udarnog kratkog spoja vršimo većinom samo na modelima, na pokusnim komadima nekog tipnog reda i na transformatorima za pogon ispravljača.



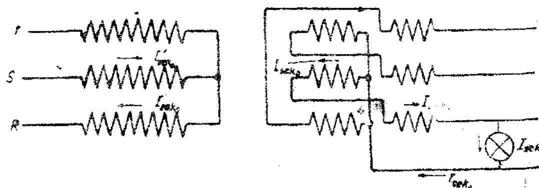
Sl. 30. Jednofazno opterećenje jezgrastog transformatora u spoju zvijezda-zvijezda. Dopuštena struja cca 10% nominalne.

Grupe spoja (vidi pregled). Namoti primarne i sekundarne strane višefaznih transformatora mogu biti spojeni u zvijezdu, trokut ili cikcak. Koji ćemo spoj odabrati, zavisi o svrsi, kojoj transformator služi. Razlikujemo male transformatore za razdiobu, s malo ili potpuno opteretivom nultočkom, velike transformatore za razdiobu s potpuno opteretivom nultočkom za mreže s nulvôdom, te velike transformatore za centrale i stanice, koji ne služe za razdiobu.

U spoju zvijezda-zvijezda grupe Yy 0 dopušteno je opterećenje nultočke jezgrastog transformatora samo do malog iznosa od cca 10% nominalne snage. Sl. 30 pokazuje, da na primarnoj strani mora teći struja i u namotima obaju neopterećenih stupova. Suma amperzavoja u oba prozora jednaka je doduše nuli, no preostaje u sva tri stupa jednako usmjereno

magnetiziranje sa zatvaranjem silnica kroz zrak i kotao. Posljedica je osjetljivo poremećenje simetrije napona.

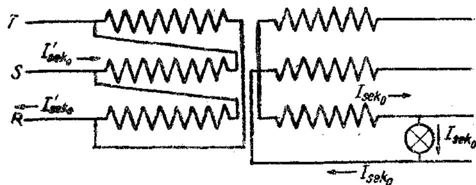
U spoju zvijezda-cikcak (grupa Yz 5) možemo nultočku potpuno opteretiti. Struja jednofaznog opterećenja (sl. 31) podijeli se jednoliko na sekundarnu i na primarnu stranu dvaju stupova. Ovaj spoj uzimamo kod manjih snaga.



Sl. 31. Jednofazno opterećenje transformatora u spoju zvijezda-cikcak. Suma amperzavoja po stupu jednaka je nuli. Dopuštena struja jednaka je nominalnoj.

Kod spoja trokut-zvijezda (grupa Dy 5) može se nul-točka također potpuno opteretiti. Jednofaznoj sekundarnoj struji opterećenja odgovara na primarnoj strani struja, koja dolazi direktno iz mreže, te ne protječe druge faze. Opterećeni stup ponaša se kao jednofazni transformator. Ovaj spoj odabiramo kod velikih jedinica (sl. 32).

Spoj zvijezda-trokut (grupa Yd 5) uzimamo kod velikih transformatora, jer je kod njega onemogućeno izlaženje rasipnih tokova trostruke frekvencije. Unutar trokutnog namota može se razviti struja trostruke frekvencije, potrebna za magnetiziranje. Kod vrlo velikih pak jedinica, koje sekundarno snabdijevamo zemljospojnim svitkom, odabiramo spoj zvijezda-zvijeda Yy 0, no izvodimo transformator sa trokutnim tercijarnim namotom, u kojemu je cca 20 do 30% količine bakra jednog radnog namota.



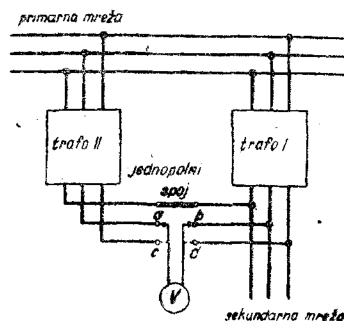
Sl. 32. Jednofazno opterećenje transformatora u spoju trokut-zvijezda. Suma amperzavoja po stupu jednaka je nuli. Dopuštena struja jednaka je nominalnoj.

Pregled grupa spoja vidi se na str. 58. U grupi 0 sekundarni naponi stezaljki u fazi su s primarnima, u grupi 6 naprotiv u protufazi. U grupi 5 sekundarni su naponi fazno zakrenuti za 150°, a u grupi 11 za 330° prema primarnim naponima. Kod slobodnog izbora grupe dajemo prednost grupi 0 pred grupom 6, i grupi 5 pred grupom 11. Grupe 6 i 11 upotrebljavamo samo onda, kad novi transformatori treba da rade paralelno s već postavljenima.

Kod jednofaznih transformatora, koji pripadaju posebnoj grupi, oba napona su u istom faznom položaju.

Stezaljke označujemo sa *UVW* na strani gornjeg napona, *uvw* na strani donjeg napona. Sa *O* i *o* označujemo zvjezdišta. Kod jednofaznih transformatora označujemo stezaljke *UV* i *uv*, pri čemu je smisao namatanja, počevši od jednako označenih stezaljki, isti.

Paralelni rad. Transformatori, koji rade paralelno, moraju imati isti prijenosni omjer u praznom hodu i isti napon kratkog spoja, te moraju pripadati istoj grupi spoja. Samo ako su ovi uvjeti ispunjeni, ne će doći u praznom hodu do struja izjednačenja, a kod opterećenja razdijelit će se struje po veličini procentualno ispravno na obje jedinice. Da bi i fazni kut obiju struja bio isti, treba da bude ispunjen daljnji uvjet istoga kuta u kratkom spoju, t. j. kako rasipni naponi, tako i relativni djelatni padovi napona moraju se podudarati. U praksi se pokazuje, da transformatori, kod kojih se prijenosni omjeri razlikuju procentualno do 1/20 napona kratkog spoja, izraženog u postocima, u paralelnom radu još zadovoljavaju. Kod transformatora s naponom kratkog spoja 10% smije dakle prijenosni omjer odstupati za 0,5% prema onome paralelno spojenog transformatora. Dopustivo odstupanje kod napona kratkog spoja iznosi 10% njegove vrijednosti.



Sl. 33. Kontrola ispravnog spoja prije priključivanja na sekundarnoj strani transformatora II. Nakon jednopolnog spajanja mjeriti napon između a — b i između c — d. Ako je ovaj jednak nuli, može se priključiti tropolno.

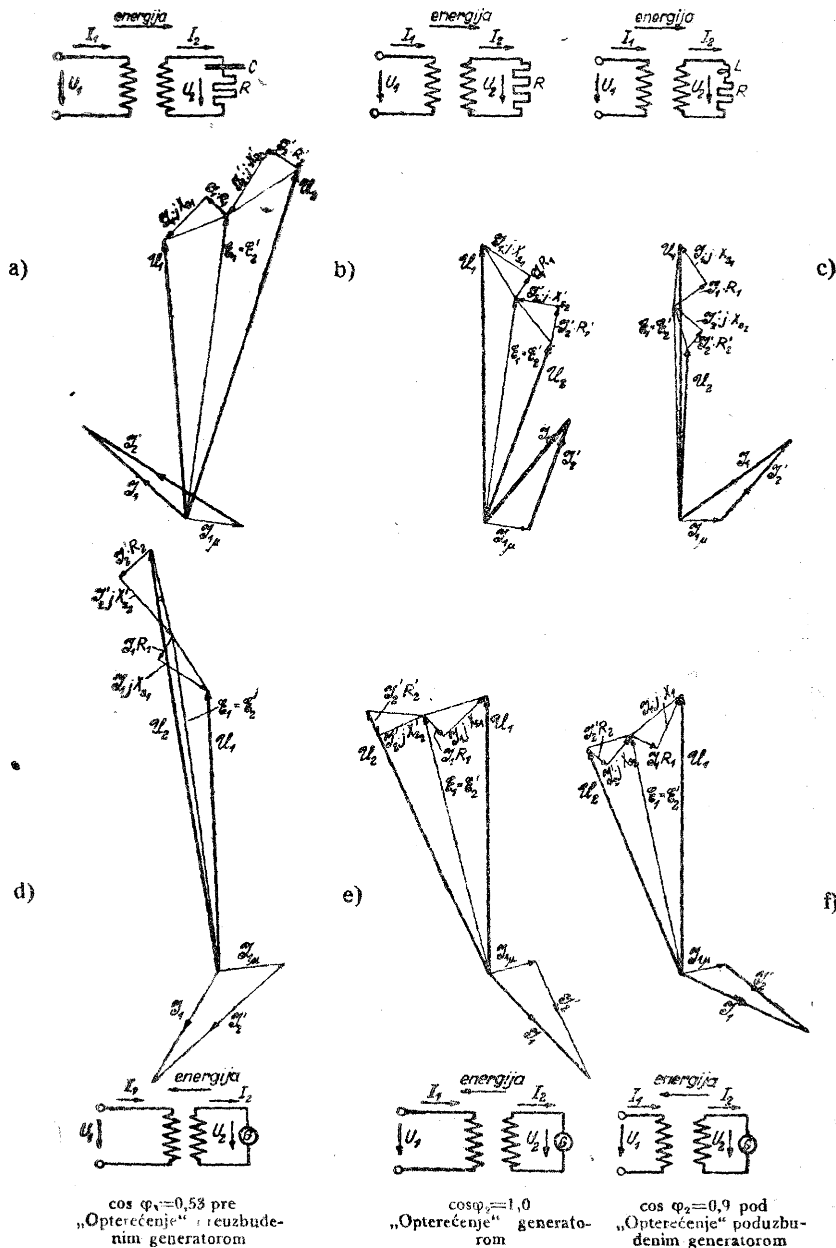
Paralelni rad transformatora s većom razlikom u snagama od 1 : 3 izbjegavamo. Da bismo izbjegli preopterećenje manjeg transformatora, treba da bude njegov napon kratkog spoja veći. U slučaju odstupanja možemo napone kratkog spoja po iznosu izjednačiti prigušnicama. Kontrolu ispravnog spoja, t. j. istog faznog položaja sekundarnih napona prilikom priključivanja drugog transformatora vršimo prema sl. 33. Drugi transformator priključimo jednopolno na sekundarne sabirnice. Voltmetar, priključen na oba mjesta prekida, ne smije tada pokazati napon. Ako je to ispunjeno, možemo bez bojazni uklopiti.

Dijagram transformatora. Napone i struje u primarnom i u sekundarnom namotu transformatora prikazujemo u t. zv. dijagramu transformatora. Crtamo ga samo za jednu fazu, jer bi prikaz za ostale faze predstavljao samo opetovanje svih veličina zakrenutih za isti kut. Preporučuje se, da se sekundarni napon i sekundarna struja riše onako, kao što je općenito uobičajeno kod potrošača. I primarne je veličine najbolje prikazati na isti način, pri čemu možemo zamišljati, da je primarna strana također potrošač, s obzirom na mrežu, koja je poji. Prednost je ovakva prikazivanja, da oba napona i obje struje u dijagramu nisu međusobno zakrenuti za gotovo 180°, nego se na jednostavan način vidi, kako sekundarni napon dobivamo iz primarnog napona, kad odbijemo djelatne i induktivne padove napona, i kako primarnu struju dobivamo kao sumu struje praznog hoda i preračunate sekundarne struje. Osim toga razabiramo, da idealni transformator bez struje magnetiziranja i bez padova napona tako djeluje, kao da ga

$\cos\varphi = 0{,}80$ preth. opterećenje kapacitivnim potrošačima (na pr. preuzbuđeni sinhroni motor)

$\cos\varphi_2 = 1$, Opterećenje čisto djelatnim potrošačima (na pr. rasvjeta)

$\cos\varphi_2 = 0{,}56$ zaost. Opterećenje induktivnim potrošačima na pr. asinhroni motor)



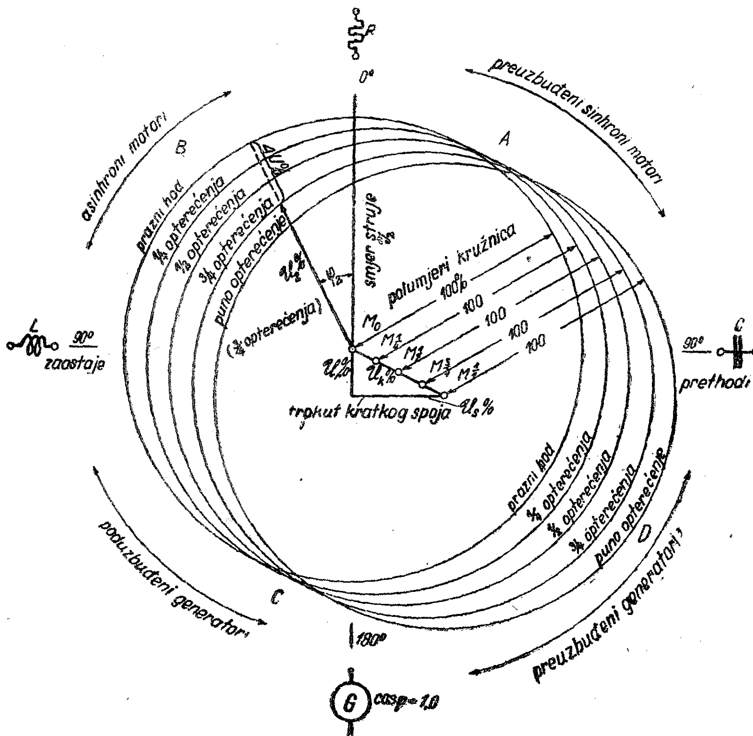
$\cos\varphi_1 = 0{,}53$ pre „Opterećenje" preuzbuđenim generatorom

$\cos\varphi_2 = 1{,}0$ „Opterećenje" generatorom

$\cos\varphi_2 = 0{,}9$ pod „Opterećenje" poduzbuđenim generatorom

Sl. 34. Dijagrami transformatora; *a, b, c* za davanje energije na sekundarnoj strani; *d, e, f* za vraćanje energije (Dijagrami su crtani kao dijagrami potrošača. Djelatni padovi $\mathcal{I}_1 R_1$ i $\mathcal{I}'_2 R'_2$ u fazi su sa strujama, induktivni padovi $\mathcal{I}_1 \cdot jXs_1$ i $\mathcal{I}'_2 \; jX's_2$ prethode u fazi za 90°. Prikazane) jednadžbe glase: $\mathcal{U}_1 - \mathcal{I}_1 R_1 - \mathcal{I}_1 \cdot jXs_1 = \mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2'$; $\mathcal{E}'_2 - \mathcal{I}'_2 R'_2 - \mathcal{I}'_2 \cdot jX's_2 = \mathcal{U}'_2$; $\mathcal{I}_1 = \mathcal{I}_{1\mu} + \mathcal{I}'_2$

uopće nema. $\mathcal{U}_1$ i $\mathcal{U}_2$ kao i $\mathcal{J}_1$ i $\mathcal{J}_2$ podudaraju se. Prikazivanje, prema kojemu se napon $\mathcal{U}_2$ čini gotovo za 180^0 zakrenut prema $\mathcal{U}_1$, treba zabaciti, jer stvara pogrešni utisak, da je sekundarni napon na stezaljkama zaista pomaknut prema $\mathcal{U}_1$ za taj veliki kut također i u slučaju namatanja u istom smislu.



Sl. 35. Kapp-ov dijagram. (Ucrtani vektor napona $\mathcal{U}_2$ vrijedi za opterećenje induktivnim potrošačima sa ¾ nominalne struje i uz faktor snage 0,89; ΔU iznosi 30%. U području A B C nastupa smanjenje napona, u području C D, A povećanje napona. Napon kratkog spoja je pretjerano velik!)

Na sl. 34 nacrtani su dijagrami za sve moguće slučajeve opterećenja, uključivši vraćanje snage i uzimajući zasebno u obzir pojedine otpore na primarnoj i na sekundarnoj strani. Na sl. 35 vidimo način prikazivanja po Kappu, koji je pojednostavljen, no u praksi zadovoljava, a računa samo s ukupnim padom napona. Kao ukupni pad napona odabiramo nominalni napon kratkog spoja, ako dijagram rišemo, kao obično, za nominalnu struju = 100% i za nominalni napon = 100%.

Sekundarne veličine $\mathcal{J}_2'$, $\mathcal{U}_2'$, jX_{s2}' i R_2' u dijagramima odgovaraju strujama, naponima i otporima, preračunatim na primarnu stranu. Pri tome vrijedi:

$$\mathcal{U}_2' = \mathcal{U}_2 \cdot k_{12} \quad \text{te} \quad \mathcal{U}_2 = \mathcal{U}_2'/k_{12} \quad \text{uz} \quad k_{12} = U_1/U_{20} = w_1/w_2,$$
$$\mathcal{I}_2' = \mathcal{I}_2/k_{12} \qquad \mathcal{I}_2 = \mathcal{I}_2' \cdot k_{12},$$
$$R_2' = R_2 \cdot k_{12}^2 \qquad R_2 = R_2'/k_{12}^2,$$
$$jX_{s2}' = jX_{s2} \cdot k_{12}^2 \qquad jX_{s2} = jX_{s2}'/k_{12}^2.$$

Promjena napona. Promjenu napona, t. j. razliku napona, koja nastupa kod tereta, izraženu u omjeru prema naponu praznog hoda U_{20}, određujemo računski prema formuli:

$$u_\varphi = u'_\varphi + 1 - \sqrt{1 - u_\varphi''^2} \qquad \text{(točno)}$$
$$= u'_\varphi + 0{,}5 \cdot u_\varphi''^2 \qquad \text{(vrlo približno)}.$$

Pri tome znači:

$$u_\varphi' = u_r \cdot \cos\varphi + u_s \cdot \sin\varphi, \quad \text{te} \quad u_\varphi'' = u_r \cdot \sin\varphi - u_s \cdot \cos\varphi.$$

Vrijednosti relativnog djelatnog pada napona u_r i rasipnog napona u_s poznate su iz rezultata pokusa kratkog spoja kao komponente $u_k \cdot \cos\varphi_k$ i $u_k \cdot \sin\varphi_k$ nominalnog napona kratkog spoja u_k.

Ako je na pr. nominalni napon kratkog spoja 10%, relativni djelatni pad napona 8% i rasipni napon 6%, bit će uz $\cos\varphi = 0{,}8$

$$u_\varphi' = 0{,}08 \cdot 0{,}8 + 0{,}06 \cdot 0{,}6 = 0{,}100$$
$$u_\varphi'' = 0{,}08 \cdot 0{,}6 - 0{,}06 \cdot 0{,}8 = 0{,}00$$
$$u_\varphi = 0{,}10 + 0{,}5 \cdot 0{,}00^2 = 0{,}10 = 10\%.$$

Izračunavanje korisnosti. Kod opterećenja imamo u transformatoru samo dvije grupe gubitaka, gubitke praznog hoda i gubitke u namotu; mjerimo ih kod pokusa praznog hoda i pokusa kratkog spoja. Ukupni gubici iznose dakle:

$$Ng_{uk} = N_o + N_k \cdot \left(\frac{I}{I_n}\right)^2$$

N_o = gubitak praznog hoda kod nominalnog napona,
N_k = gubitak kratkog spoja kod nominalne struje,
I = struja opterećenja, I_n = nominalna struja.

Korisnost izračunavamo kao omjer predane djelatne snage i primljene djelatne snage:

$$\eta = \frac{\text{predana snaga u kW}}{\text{predana snaga u kW} + \text{gubici u kW}}$$
$$= \frac{(\text{prividna snaga u kVA}) \cdot \cos\varphi}{(\text{prividna snaga u kVA}) \cdot \cos\varphi + \text{gubici u kW}}.$$

Korisnost jako zavisi o faktoru snage, jer gubici zavise samo o struji, a predana snaga o produktu struje i faktora snage. Uz isti iznos u kVA, ali uz

druge vrijednosti faktora snage, čini se zato, kao da su se ukupni gubici $1/\cos\varphi$ puta povećali.

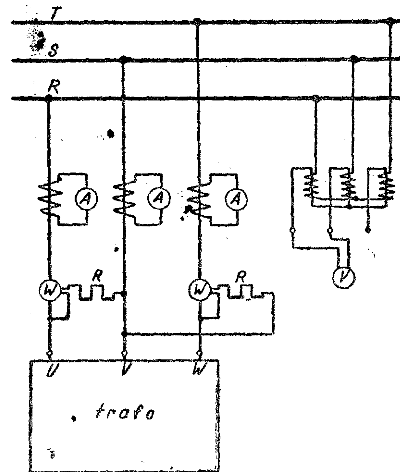
Raspodjelu gubitaka kod projektiranja transformatora odabiramo prema njegovoj kasnijoj namjeni. Transformatori za poljoprivredu, koje potpuno opterećujemo samo kroz kratko vrijeme u godini, treba da imaju što manje gubitke praznog hoda, a za industriju što manje teretne gubitke. Na taj način postizavamo najbolju godišnju korisnost.

Ispitivanje jezgre bez namota. Željeznu jezgru transformatora ispitujemo još bez namota. U ispitnoj stanici opremimo je provizornim namotom i uzbudimo naponom od 1000 do 1500 V na puni tok. To ćemo postići, ako priključimo isto toliki napon po svakom zavoju pokusnog namota, koliki bi imali kod gotovog transformatora. Razumije se, da treba raditi s istom frekvencijom. Napon po zavoju vezan je s frekvencijom i tokom:

$$U_{zavoja} = 2{,}22 \cdot \frac{f}{50} \cdot \Phi' = U_{n\,faze}/w_{faze},$$

gdje je $2{,}22 = \frac{\pi}{\sqrt{2}}$, Φ' = tok u 10^6 maksvela, f = frekvencija u Hz i w_{faze} = broj zavoja jedne faze.

Svrha je ispitivanja jezgre u prvom redu, da ustanovimo eventualne griješke konstrukcije ili izvedbe, koje se mogu očitovati kao brujanje, vibracije ili jako lokalno ugrijavanje. Zatim mjerimo već sada *gubitke praznog hoda* N_0, struju magnetiziranja I_0 u sve tri faze i priključeni napon U_0, koji se naravno ne mora podudarati ni s jednim od faktičnih nominalnih napona. Gubici praznog hoda sastoje se u biti od gubitaka zbog premagnetiziranja i gubitaka zbog vrtložnih struja, dakle t. zv. Eppsteinovih gubitaka u limovima željezne jezgre. K tome pridolazi samo još 5 do 10% t. zv. dodatnih gubitaka u željezu zbog obrade limova. Gubici u bakru neopterećenog transformatora, koje uzrokuje struja magnetiziranja, redovito su neznatni. Primijenjeni spoj mjernih instrumenata uzima u obzir vrlo mali faktor snage $\cos\varphi_0$, koji se kreće od 0,05 do 0,08. Oba vatmetra spojena su prema slici 36. Strujne grane uključene su direktno u priključke na mrežu, a naponske grane pri-



Sl. 36. Spoj mjernih instrumenata kod pokusa praznog hoda i kratkog spoja. Napon i struju mjerimo preko mjernih transformatora, vatmetri su priključeni direktno na mrežu, da bismo izbjegli korekcije. Gubitke u predotpornicima treba odbiti.

ključene su preko predotpornika na puni napon. Strujne i naponske mjerne transformatore izbjegavamo, da bismo izbjegli pogreške kod mjerenja ili mučne korekcije. Kod ovakva rasporeda smiju struje doseći 400 A, a predotpornici se upotrebljavaju do 10.000 V. Struju i napon mjerimo međutim preko mjernih transformatora. Gubitke u predotpornicima vatmetara treba uzeti u obzir.

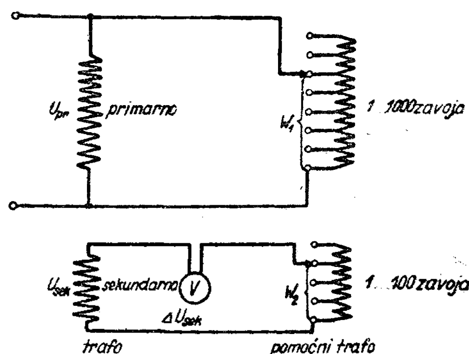
Kod velikih transformatora, koji su snabdjeveni namotima za kompenzaciju nadvalova postavimo i ove provizorno, te ispitamo njihovo djelovanje oscilografskim snimanjem struje magnetiziranja. Ako se ova krivulja struje približava zahtijevanoj sinusoidi s odstupanjem manjim od 0,5%, ne zadovoljava više grafičko istraživanje oscilograma.. Visoko osjetljive mjerne sprave za više harmoničke valove pokazuju još manja odstupanja. Kao nadvalovi, koji mogu izazvati smetnje, dolaze prije svega u obzir treći, peti i sedmi harmonički val.

Ispitivanje završavamo pokusom s magnetskim tokom povećanim za 10%, koji traje 15 minuta. Ako se ni sada ne pojave griješke, smatramo željeznu jezgru besprijekornom i šaljemo je, da se montiraju namoti.

Ispitivanje namotana transformatora bez ulja i bez kotla. Transformatore s *paralelnim granama namota* šaljemo prije dovršena spajanja ponovno na ispitivanje. Jedan od namota — koji nema paralelnih grana — uzbudimo, i to najbolje tako, da dobijemo 1 V napona po zavoju. Mjerenjem napona možemo onda lako kontrolirati broj zavoja svakog drugog namota, jer mora biti upravo toliko zavoja, koliko volta pokazuje priključeni voltmetar. Izmjerimo sve grupe, napose i odvojke. Ako na granama, koje treba spojiti paralelno, imamo isti napon, isključimo, i krajeve spojimo. Na još slobodnim krajevima mjerimo sada eventualno još postojeće razlike napona voltmetrom s vrlo malim mjernim područjem (1,0 do 1,5 V). Ako nema razlike napona, nema pogreške u broju zavoja. Možemo dakle dovršiti paralelno spajanje. U osobitim slučajevima osiguramo se prije toga još posebno na taj način, da paralelni spoj izvedemo prvo tankom žicom. Kad transformator uzbudimo, ova će pregorjeti, ako se unutar paralelnog spoja pojave struje izjednačenja. Sada se spajanje grana i čitavog namota dovrši, te se točno označe stezaljke.

Daljnje ispitivanje je određivanje *prijenosa.* Pravilo je, da pojimo uvijek stranu gornjeg napona kako bismo izbjegli nezgode. Kod toga odabiramo napon 1000 do 1500 V. Napon slobodnih stezaljki ne može onda ni u kojem slučaju doseći veće vrijednosti od ovog iznosa. Kod uobičajenih nominalnih napona na strani gornjeg napona od 3000 V dalje uzbuđujemo dakle transformator s najviše 50% nominalnog napona. Transformatori za 200000 V priključeni su kod tog pokusa čak samo na 0,5% nominalnog napona. Struju magnetiziranja možemo potpuno zanemariti, te se omjer napona izmjerenih na strani gornjeg i na strani donjeg napona potpuno

podudara, ako uzmemo u obzir spoj, s omjerom jednog i drugog broja zavoja. Za najtočnije određivanje prijenosnog omjera upotrebljavamo pomoćni transformator, koji ima primarno na pr. ukupno 1000, a sekundarno 100 zavoja. Odgovarajuća podjela omogućuje nam da biramo promjenljivi broj zavoja na obje strane zavoj po zavoj. Pomoćni transformator priključimo, prema sl. 37, u protuspoj s ispitivanim transformatorom, i udesimo njegov prijenos jednak prijenosu ovoga. Voltmetar opsega 1,0 V pokazuje, da se prijenosi slažu, kad na sekundarnoj strani ne mjeri nikakve razlike napona. I kod ovoga je pokusa najbolje, da uzmemo napon po zavoju 1 V, pa možemo odmah mjeriti brojeve zavoja. Po eventualnom otklonu voltmetra, koji pokazuje razliku napona, možemo odmah zaključiti o odstupanju prijenosa.



Sl. 37. Mjerenje prijenosnog omjera pomoćnim transformatorom, kojemu možemo udešavati broj zavoja, zavoj po zavoj. $k_{12} = U_{pr}/U_{sek} = w_1/w_2$, kad voltmetar pokazuje razliku napona $\Delta U_{sek} = 0$.

Kod direktnog mjerenja napona prilikom određivanja prijenosa najbolje je, da izbjegavamo naponske mjerne transformatore, te da upotrebljavamo samo predotpornike.

Nakon toga ispitujemo ispravnost *spoja*, t. j. kontroliramo, da li su ispunjeni uvjeti propisane grupe spoja. Slike 38 a-h tumače slijedeća mjerenja, koja vršimo voltmetrom na transformatoru uzbuđenu preko *UVW*.

Grupa spoja 0. Spojimo stezaljke *U* i *u* te mjerimo napone *v* — *V* i *w* — *W*. Oba napona moraju biti jednaka $U_{pr} - U_{sek}$ (sl. 38c).

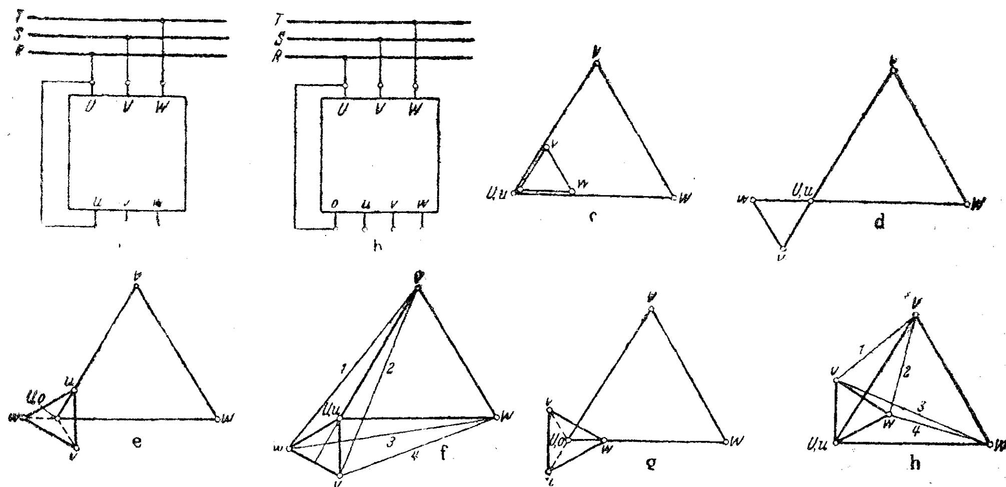
Grupa spoja 6. I opet treba spojiti stezaljke *U* i *u*. Naponi *v* — *V* i *w* — *W* moraju biti jednaki $U_{pr} + U_{sek}$ (sl. 38d).

Grupa spoja 5 s pristupačnim zvjezdištem na sekundarnoj strani. Primarnu stezaljku *U* spojimo sa sekundarnim zvjezdištem. I ovdje su dovoljna dva mjerenja napona, između *u* — *V*, koji treba da bude jednak $U_{pr} - U_{sek}/\sqrt{\;}$ te između *w* — *W*, koji je jednak $U_{pr} + U_{sek}/\sqrt{3}$ (sl. 38e).

Grupa spoja 5 bez pristupačnog zvjezdišta na sekundarnoj strani. U ovom slučaju treba spojiti *U* sa *u*. Treba izmjeriti četiri napona, i to *V* — *v*, *V* — *w*, *W* — *v* i *W* — *w*. Iz ovih mjerenja odredimo šestarom položaj točaka *v* i *w*, koje će ležati, kako je prikazano na sl. 38f.

Grupa spoja 11 sa pristupačnim sekundarnim zvjezdištem. Zvjezdište spojimo sa *U*. Dva mjerenja napona treba da pokažu, da je napon *W* — *w* jednak $U_{pr} - U_{sek}/\sqrt{3}$, a napon *V* — u jednak $U_{pr} + U_{sek}/\sqrt{3}$ (sl. 38g).

Grupa spoja 11 bez pristupačnog zvjezdišta na sekundarnoj strani. *U* spojimo sa *u*. Na osnovu mjerenja napona *V — v*, *V — w*, *W — v*, *W — w*, odredimo šestarom položaj točaka *v* i *w*, koje treba da leže, kako se vidi na sl. 38h.



Sl. 38 a—h. Kontrola grupe spoja 0, 6, 5, 11 mjerenjem napona. Crtanje rezultata potrebno je samo kod grupe 5 i 11 bez pristupačnog sekundarnog zvjezdišta, prema *f* i *h*. U_{pr} i U_{sek} su linijski naponi.

a) Spoj I, kod grupe 0 i 6, te kod 5 i 11 u slučaju, kad kod ovih sekundarno zvjezdište nije pristupačno.

b) Spoj II, kod grupe 5 i 11 uz pristupačno sekundarno zvjezdište.

c) Grupa 0. 2 mjerenja napona: $v - V = U_{pr} - U_{sek}$, $w - W = U_{pr} - U_{sek}$ Spoj I.

d) Grupa 6. 2 mjerenja napona: $v - V = U_{pr} + U_{sek}$, $w - W = U_{pr} + U_{sek}$ Spoj I.

e) Grupa 5. 2 mjerenja napona: $u - V = U_{pr} - U_{sek}/\sqrt{3}$, $w - W = U_{pr} + U_{sek}/\sqrt{3}$ Spoj II.

f) Grupa 5. 4 mjerenja napona: između *V*, *W*, *v*, *w*. Spoj I.

g) Grupa 11. 2 mjerenja napona: $u - V = U_{pr} + U_{sek}/\sqrt{3}$, $w - W = U_{pr} - U_{sek}/\sqrt{3}$ Spoj II.

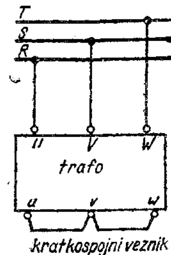
h) Grupa 11. 4 mjerenja napona: između *V*, *W*, i *v*, *w*. Spoj I.

Ako je prijenosni omjer transformatora veći od 25 : 1, postaje mjerenje napona nesigurno, jer je $U_{pr} + U_{sek}$ manje od $1{,}04 \cdot U_{pr}$, odnosno $U_{pr} - U_{sek}$ veće od $0{,}96 \cdot U_{pr}$. Obje su veličine dakle gotovo jednake. U takvu slučaju pomažemo si na jednostavan način. Preko pomoćnog transformatora u spoju zvijezda-zvijezda transformiramo sekundarni napon na veće vrijednosti, pri čemu fazni položaj ostaje isti. Otvorenu stranu pomoćnog transformatora smatramo sada sekundarnom stranom ispitivana

transformatora, pa njenu stezaljku u, odnosno zvjezdište o spojimo sa stezaljkom U ispitivana transformatora.

Ako smo kod ovih ispitivanja ustanovili, da su prijenos i grupa spoja ispravni, možemo jednoznačno zaključiti, da je spoj transformatora ispravan.

Zatim izvodimo *pokus kratkog spoja*. Spoj je isti kao što smo ga upotrebljavali kod pokusa praznog hoda, samo stezaljke na strani donjeg napona spojimo po mogućnosti bez otpora kratko. Normalni mjerni transformatori u kratkospojnom krugu mogu gdjekada osjetljivo iskriviti rezultat, te ih zato ne uključujemo. Ako ipak želimo mjeriti i sekundarnu struju kratkog spoja, možemo bez daljnjega upotrebiti Dietzeova kliješta, koja imaju tek vrlo mali dodatni djelatni i rasipni induktivni otpor. Transformator pojimo sa strane gornjeg napona, jer je u ispitnoj stanici lakše pribaviti za tu stranu manju struju kratkog spoja uz odgovarajući veći napon. Spoj je prikazan na sl. 39. Dovedeni napon podignemo brzo toliko, da transformator uzima struju kratkog spoja od 1/2 do 1/1 I_n. Očitavanje treba završiti unutar cca 2 min nakon početka pokusa, da bismo izbjegli nedopušteni porast temperature. Do ovoga može doći, jer još nema rashladnog djelovanja ulja. Mjerimo napon U_k, struju I_k i snagu N_k. Kod transformatora sa zasebnim tercijarnim namotom mjerimo, ako možemo trokutni namot na jednom mjestu otvoriti, napon trostruke frekvencije, koji se tamo pojavljuje, a koji induciraju tokovi trostruke frekvencije.



Sl. 39. Kratki spoj. Instrumenti kao u sl. 36.

Iz rezultata pokusa izračunavamo nominalni napon kratkog spoja

$$u_k \text{ u } \% = \frac{(\text{napon u kratkom spoju, kod kojega teče nominalna struja}) \cdot 100}{\text{nominalni napon primarne strane}}$$

i relativni djelatni napon $u_r\ \% = u_k \cdot \cos\varphi_k$,
rasipni napon $u_s\ \% = u_k \cdot \sin\varphi_k$.

Teretne gubitke dobivamo iz gubitaka mjerenih u kratkom spoju kod nominalne struje, kad odbijemo eventualne zamjetljive gubitke u vanjskom kratkospojnom vezniku. U slučaju da smo gubitke odredili za neku drugu struju, treba ih preračunati na nominalnu struju. Oni se sastoje od gubitaka u samim djelatnim otporima u oba namota i od dodatnih gubitaka zbog vrtložnih struja, koji nastaju u bakru i konstruktivnim dijelovima u blizini namota. Ako temperatura namota nije bila 75°, treba djelatne gubitke preračunati na tu temperaturu, i to tako, da ih povećamo u omjeru (235 + 75) : : (235 + temperatura kod mjerenja). Dodatni gubici su obično tako neznatni, da se možemo odreći preračunavanja. Ako to ipak želimo učiniti, onda treba računati s obrnutim omjerom, jer gubici vrtložnih struja padaju, kad temperatura raste. Kod aluminijskih namota treba mjesto 235 uvrstiti vrijednost 245. Gubici u vanjskom kratkospojnom vezniku zamjetljivi su samo

kod malih napona i velikih struja na sekundarnoj strani, na pr. kod transformatora za električke peći. Računamo ih:

$N_{k\ vezn} = 2{,}5 \cdot G \cdot j^2$ u W, gdje je G = težina kratkospojnog veznika u kg
j = gustoća struje u vezniku u A/mm².

Struje kratkog spoja mijenjaju se u širokom području linearno s naponom. Kod kratkog spoja s punim naponom dobivamo još uvijek jakosti struje, koje možemo preračunati iz rezultata pokusa kratkog spoja. Struju kratkog spoja kod nominalnog napona izraženu u omjeru prema nominalnoj struji dobivamo kao $100/u_k$%. Ona ne smije prekoračiti 30-struku vrijednost, jer kod toga momentana maksimalna vrijednost, koja nastupa u jednoj fazi kod udarnog kratkog spoja, može već doseći $30 \cdot \sqrt{2} \cdot 1{,}8 = 75$-struku vrijednost nominalne struje. Veće struje ne može namot više izdržati. Nominalni napon kratkog spoja transformatora ne smije zbog toga biti manji od 3,3%. U protivnom slučaju moramo se pobrinuti, da ga povećamo prigušnicama za ograničenje struje.

Za crtanje dijagrama potrebne su nam još ove vrijednosti, koje dobivamo iz vrijednosti mjerenih kod pokusa:
Kod namota gornjeg napona spojenog u trokut treba uzeti vrijednosti tro-

$$\text{impedancija kratkog spoja } Z_k = \frac{\text{napon kratkog spoja}}{\text{struja kratkog spoja}} = U_k/I_k \text{ u } \Omega,$$

$$\text{otpor kratkog spoja } R_k = \frac{\text{snaga kratkog spoja}}{(\text{struja kratkog spoja})^2} = N_k/I_k^2 \text{ u } \Omega,$$

$$\text{reaktancija kratkog spoja } X_k = \frac{1}{I_k}\sqrt{U_k^2 - (N_k/I_k)^2} \text{ u } \Omega,$$

te analogno tome:

Kod trofaznih transformatora spojenih u zvijezdu na strani gornjeg napona:

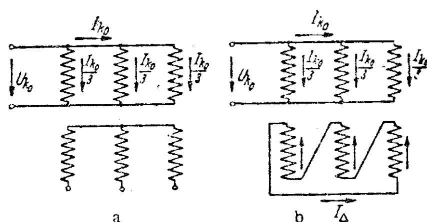
$$Z_k = \frac{U_k}{\sqrt{3} \cdot I_k}, \quad R_k = \frac{N_k}{3\ I_k^2}, \quad X_k = \sqrt{\frac{U_k^2}{3} - \left(\frac{N_k}{3I_k}\right)^2}.$$

Kod namota gornjeg napona spojenog u trokut treba uzeti vrijednosti trostruko, računajući po fazi. Pod Z_k, R_k i X_k razumijevamo zbroj vrijednosti primarne i sekundarne impedancije, odnosno otpora i reaktancije, reduciranih na 1 fazu namota gornjeg napona. Želimo li ih razdijeliti na jednu i na drugu stranu, možemo bez oklijevanja uvrstiti po pola vrijednosti. Otpore, reaktancije i impedancije za stranu donjeg napona, koja je kod pokusa bila kratko spojena, moramo naravno pomnožiti sa $1/k_{12}^2$. Vrijednosti su povezane još s ovim odnosima:

$$R_k = Z_k \cdot \cos\varphi_k, \qquad X_k = Z_k \cdot \sin\varphi_k$$

uz $\cos\varphi_k$ = faktor snage u kratkom spoju i $\sin\varphi_k = \sqrt{1 - \cos^2\varphi_k}$.

Nulreaktanciju određujemo kod transformatora, koji treba da rade s Petersenovom prigušnicom za kompenzaciju zemljospoja, još jednim pokusom kratkog spoja prema sl. 40. Nulreaktancija je induktivni otpor, koji se suprotstavlja jednofaznoj struji, što teče istovremeno na sva tri stupa. Na njenu veličinu odlučno utječe prisutnost radnog ili tercijarnog namota spojenog u trokut. Čim se naime na tri stupa nalazi trokutni namot, može u njemu teći protustruja, koja praktički poništava magnetizirajuće djelovanje nul-struje, istofazne u svim namotima. Budući da kotao može utjecati na formiranje silnica, koje se zatvaraju izvana, najbolje će biti da pokus ponovimo nakon ugradnje transformatora u kotao. Nulreaktancija svih triju paralelno spojenih faza izlazi:



a) Trafo bez trokutnog namota, velika nulreaktancija. b) Trafo sa trokutnim namotom, mala nulreaktancija.

Sl. 40. Mjerenje nulreaktancije

$$X_0 = \frac{U_{k_0}}{I_{k_0}} \cdot \sin \varphi_{k_0},$$

pri čemu U_{k_0} znači dovedeni napon, a I_{k_0} dovedenu struju. Nulreaktancija po fazi je tri puta veća. U svakoj fazi teče struja $I_{k_0}/3$. Faktor snage $\cos \varphi_{k_0}$ — i odavle $\sin \varphi_{k_0}$ — izračunavamo iz primljene snage. Rasipni napon, koji odgovara nulreaktanciji iznosi 25 do 35% kod transformatora bez trokutnog namota, a samo 2,5% kod onih s trokutnim namotom, ako u zvjezdištu oduzimamo nominalnu struju.

Ispitivanje gotova transformatora s kotlom, napunjenim uljem. Tek pošto je čitav transformator dovršen, možemo izvršiti *ispitivanja električke čvrstoće*. Ova su ispitivanja propisana (RET) te se sastoje od naponskog pokusa na namotu, pokusa strmim valovima, i naponskog pokusa među zavojima. Pokus strmim valovima, koji mnogi proizvađači ne izvode iz razloga navedenih na str. 5, kod transformatora je prilično bezazlenog karaktera. Stvarni uvid daju nam oba preostala pokusa.

Naponski pokus na namotu vršimo naponom, koji određuju propisi (RET), i to tako, da spojimo jedan pol izvora struje na namot, koji ispitujemo, a drugi pol na ostale namote, koji su spojeni s jezgrom i među sobom. Do 150 kV mjerimo ispitni napon preko naponskog mjernog transformatora na strani gornjeg napona visokonaponskog ispitnog transformatora. Još veće vrijednosti određujemo pak s pomoću iskrišta, no zbog sigurnosti mjerimo pri tome još i napon na strani niskog napona. Pokus vršimo sinusnom strujom od 50 Hz i ovaj traje 1 minutu.

Pokus strmim valovima vršimo na način naveden u propisima (RET).

Naponskim pokusom među zavojima treba istražiti, da li je dovoljna međusobna izolacija pojedinih zavoja. Prema propisima (RET) izvodimo ga po mogućnosti 2-strukim nominalnim naponom. U praksi ispitujemo gotovo isključivo tim naponom. Transformator pojimo strujom od 150 Hz, tako da mu je magnetska indukcija u željezu samo 66,7% normalne vrijednosti. Tako visoku frekvenciju odabiramo, da bismo izbjegli neugodne gubitke u željezu. Kod transformatora s regulacijom pod teretom reguliramo za vrijeme od 5 minuta, koliko traje ispitivanje, kroz čitav opseg, te na taj način istovremeno strogo ispitujemo sva kontaktna mjesta.

Poslije ovih ispitivanja određujemo *otpor* namota. Prema njegovoj veličini upotrebljavamo, kao i kod strojeva, Wheatstoneov ili Thomsonov most. Kod osobito malih otpora namota izvodimo mjerenje i metodom struje i napona (str. 339).

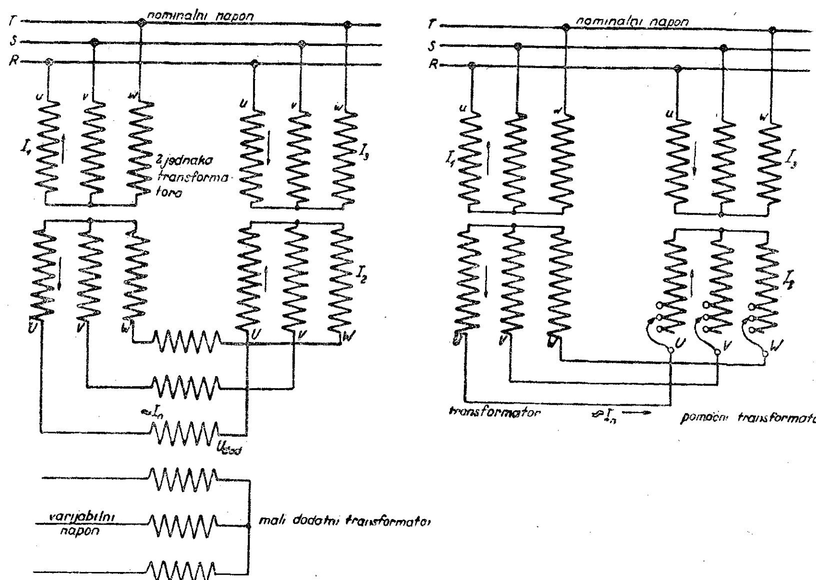
Ponavljamo *pokus praznog hoda*. Kod transformatora do cca 10000 kVA odredimo samo jednu točku za nominalni napon, dok kod većih jedinica snimamo 3 točke, za 90, 100 i 110% nominalnog napona. Vatmetre i opet upotrebljavamo bez mjernih transformatora. Na ovaj način možemo instrumentima direktno, odnosno preko predotpornika dovesti struje do 400 A i napone do 10000 V. Kod još viših napona treba mjeriti snagu ispred transformatora ispitne stanice, koji upotrebljavamo za uzbudu i odbiti njegove gubitke. Ove smo odredili jednom za uvijek pod najrazličitijim okolnostima, te ih pregledno prikazali u krivuljama gubitaka. Ispitivani transformator pojimo gotovo isključivo sa strane donjeg napona, jer bismo u protivnom slučaju sve dovode morali izolirati za visoki gornji napon od gdjekada nekoliko stotina kV, te bismo prije svega morali imati prikladan transformator u ispitnoj stanici. Struje i napone mjerimo pak na samom ispitivanom transformatoru preko mjernih transformatora.

Ponovnim određivanjem *prijenosa* i *grupe spoja* osvjedočujemo se, da se kod ugradnje transformatora u kotao nije ništa promijenilo.

Pokus kratkog spoja također ponovimo. Kod transformatora bez trokutnog namota može se dogoditi, da gubici budu sada veći, što se svodi na dodatne gubitke zbog vrtložnih struja u kotlu. Naprotiv, ako je takav namot izveden, nema praktički nikakve razlike prema prijašnjem mjerenju. Tercijarni namot vodimo gotovo uvijek na dvije stezaljke iznad poklopca, koje su u pogonu spojene, te zatvaraju trokut. U takvu slučaju izvodimo dva mjerenja, s otvorenim i zatvorenim trokutom, pri čemu možemo u prvom slučaju očekivati povećane gubitke. Trajanje pokusa možemo produljiti, jer ulje osigurava dobro hlađenje namota. Pokus izvodimo s nominalnom strujom. Kod regulacionih transformatora ponavljamo ga za najviši i najniži položaj.

Pokus zagrijavanja. Pokusom zagrijavanja određujemo nadtemperaturu, na koju će se ugrijati namoti i ulje prema ulaznoj temperaturi rashlad-

nog sredstva. Samo kod transformatora za kratkotrajni pogon određujemo umjesto toga zagrijavanje prema hladnom početnom stanju. Tek vrlo rijetko raspolažemo velikim snagama za izvođenje pokusa trajnoga rada, pa je stoga iznesen čitav niz umjetnih spojeva, kod kojih uzimamo iz mreže ispitne stanice samo snagu veličine jednostrukih ili dvostrukih gubitaka. U praksi se ograničujemo često na dvije od tih metoda, i to kod transformatora do 1000 kVA dajemo prednost metodi povratnog rada, a kod većih tipova metodi kratkog spoja.



Sl. 41. Spoj za povratni rad kod pokusa zagrijavanja. Oba transformatora priključena su primarno na puni napon. Sekundarno su spojeni paralelno preko dodatnog transformatora (a), ili direktno (b). U prvom slučaju struju opterećenja tjera kroz vodiče dodatni napon, u drugom slučaju razlika sekundarnih napona.

Kod *metode povratnog rada* potrebna su nam dva jednaka transformatora, od kojih jedan može naravno biti transformator ispitne stanice. Kod tih snaga ionako većinom raspolažemo s više jednakih transformatora. Sl. 41 prikazuje spoj. Oba primarna namota priključena su na mrežu nominalnog napona i frekvencije. Oba transformatora rade dakle s punim magnetskim tokom i zbog toga imaju normalne gubitke u željezu. Sekundarni namoti spojeni su paralelno preko pomoćnog transformatora u otvorenom spoju. Ovaj pomoćni transformator pojimo generatorom ispitne stanice, kojemu se napon može regulirati. Napon dižemo tako dugo, dok ne dobijemo sekundarno u oba ispitivana transformatora nominalnu struju. Primarne se struje nešto razlikuju, jer se struja magnetiziranja iz mreže različito superponira struji kratkog spoja. Zatim fino reguliramo tako dugo, dok u jednom

od dvaju transformatora ne dobijemo u oba namota zajedno gubitke, koji odgovaraju nominalnom pogonu. Pokus zagrijavanja traje nekoliko sati. Možemo ga prekinuti, kad prirast temperature više ne prelazi 1° na sat. Temperaturu ulja mjerimo barem ispod sama poklopca. Kod novih izvedaba snimamo s pomoću ugrađenih termoelemenata još i temperaturu željezne jezgre, a po mogućnosti i namota. Kod toga ugrađujemo također još i daljnje termometre za mjerenje temperature ulja u različitim visinama. Iz njihovih očitanja možemo zaključivati o valjanosti uređaja za hlađenje.

Kod *metode kratkog spoja* nije nam potreban drugi transformator. Transformator kratko spojimo, te mu dovodimo takav napon, da on uzima 1,5-struku nominalnu struju. Na taj način radimo 1 sat. Za slijedeća 2 sata smanjimo struju na 1,3-struku vrijednost. Početkom 4. sata smanjimo struju još jednom, i to toliko, da gubici u namotu budu jednaki normalnim ukupnim gubicima, uključivši gubitke u željezu. To dakle znači, da će zagrijavanje ulja biti ispravno, no namot će biti nešto preopterećen. Čim temperatura ulja više ne raste, smanjimo struju na nominalnu i nastavimo pokus još cca ½ do 1 sata. Tada možemo pretpostavljati, da je i nadtemperatura namota dosegla svoju pravu vrijednost, nadtemperatura pak ulja nije još znatno pala. Sada isklopimo, obustavimo dodatno hlađenje zrakom ili vodom, ako postoji, te izmjerimo temperaturu ulja na najtoplijem mjestu.

Srednju temperaturu namota određujemo, kao kod strojeva, iz procentualnog prirasta otpora primarnog i sekundarnog namota. Upotrebljavamo ove formule:

$$t_{nad} = \frac{R_{tpl} - R_{hl}}{R_{hl}} \cdot (235 + t_{hl}) - (t_{rashl} - t_{hl}),$$ kod trajnog pogona, odnosno

$$= \frac{R_{tpl} - R_{hl}}{R_{hl}} \cdot (235 + t_{hl})$$

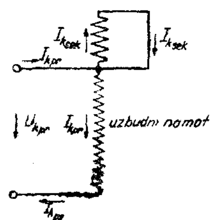
kod kratkotrajnog pogona i trajnog pogona s kratkotrajnim opterećenjem ispod 1 sata.

Pri tome znači R_{tpl} i R topli i hladni otpor namota, t_{hl} temperaturu namota kod hladnog mjerenja i t_{rashl} ulaznu temperaturu rashladnog sredstva.

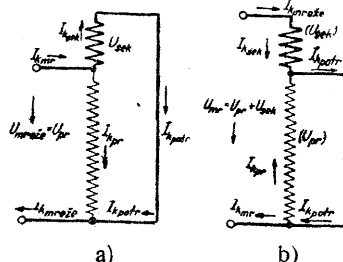
Danas su veći transformatori vrlo često snabdjeveni uređajem, koji nam omogućuje na temelju *termičkog preslikavanja,* da trajno u pogonu nadziramo srednju temperaturu namota. Ispod poklopca nalazi se električki otpornički termometar (str. 348), a okružuje ga ogrjevni namot. Ovaj se sastoji od više zavoja žice s izolacijom, koja je termički slična onoj glavnog namota. Ogrjevni namot pojimo preko posebnog strujnog transformatora, kroz koji teče struja transformatora. Namot za grijanje je obilno dimenzioniran, tako da treba jedan dio struje grijanja voditi preko paralelnog regulacionog otpornika. Ovaj omogućuje udešavanje uređaja. Udesimo ga tako, da instrument priključen na otpornički termometar pokazuje upravo

postojeću nadtemperaturu namota. Ako želimo, on može pokazivati i maksimalnu nadtemperaturu namota prema ulju. Uređaj se može izvaditi i udešava se u maloj uljnoj kupki izvan transformatora, kojoj se temperatura može udesiti da bude jednaka temperaturi ulja u transformatoru. Temperaturu ulja u transformatoru mjerimo iz daljine normalnim ugrađenim otporničkim termometrom.

Štedni transformatori. Ovi transformatori služe većinom samo za neznatno podizanje ili smanjivanje napona sekundarne mreže, koja je priključena na primarnu mrežu. Obje su mreže preko zavoja sekundarnog namota vodljivo međusobno spojene. Ovaj namot ima često odvojke, koji omogućuju regulaciju napona u nekoliko stepena. Ispitivanje ovih transfor-



Sl. 42. Pokus kratkog spoja štednog transformatora



a) b)

Sl. 43. Oznake struja kod kratkog spoja na strani potrošača štednog transformatora. Naponi u zagradi vrijede kod praznog hoda.

matora odgovara onomu kod normalnih transformatora. Samo *pokus kratkog spoja* ne izvodimo u pogonskom spoju, već prema sl. 42, u spoju, koji bi odgovarao, kad bi ga upotrebili kao obični transformator. Pojimo dakle primarni namot iz tanke žice, a sekundarni namot iz debele žice kratko spojimo. Označimo li sa i'_{pr} struju kratkog spoja, reduciranu na nominalni napon U_{pr}, bit će *struje kratkog spoja,* koje nastupaju u pogonskom spoju, uz oznake prema sl. 43a:

$$I_{k_{pr}} = i_{k_{pr}} \cdot \frac{U_{pr} + U_{sek}}{U_{sek}},$$

$$I_{k_{sek}} = i_{k_{potr}} = i_{k_{pr}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sek}} \cdot \frac{U_{pr} + U_{sek}}{U_{sek}},$$

$$I_{k_{mreže}} = I_{k_{pr}} + I_{k_{sek}} = i_{k_{pr}} \cdot \left(\frac{U_{pr} + U_{sek}}{U_{sek}}\right)^2.$$

U slučaju da transformator služi za smanjivanje dovedenog napona mreže, izlaze uz oznake prema sl. 43b vrijednosti:

$$I_{k_{pr}} = i_{k_{pr}} \cdot \frac{U_{pr} + U_{sek}}{U_{sek}},$$

$$I_{k_{sek}} = I_{k_{mreže}} = i_{k_{pr}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sek}} \cdot \frac{U_{pr} + U_{sek}}{U_{sek}},$$

$$I_{k_{potr}} = I_{k_{sek}} + I'_{k_{pr}} = i_{k_{pr}} \cdot \left(\frac{U_{pr} + U_{sek}}{U_{sek}}\right)^2.$$

Snaga kratkog spoja, koju bi štedni transformator uzimao iz mreže silno se povećava prema snazi kratkog spoja n_k kod transformatora kratko spojenog samo u sekundarnom dijelu. Ta je snaga za oba spoja jednako velika te iznosi:

$$N_k = n_k \cdot \left(\frac{U_{pr} + U_{sek}}{U_{sek}}\right)^2.$$

Vidimo, da su struje i snage u kratkom spoju to veće, što manji je dodatni napon U_{sek} uz određeni primarni napon U_{pr}. One su u omjeru$(U_{pr} + U_{sek}) : U_{sek}$ veće nego kod normalnog transformatora iste prolazne snage.

Prolazna snaga štednog transformatora po iznosu je jednaka, ako su mu namoti spojeni serijski u istom smislu, $(U_{pr} + U_{sek}) : U_{sek}$ - strukom iznosu vlastite snage. Praktički govoreći, treba ga dimenzionirati samo za onaj postotak prolazne snage, koji odgovara omjeru dodatnog napona prema mrežnom naponu.

Zakretni transformatori, koje većinom spajamo u štedni spoj, obrađeni su u poglavlju o asinhronim strojevima.

Tolerancije. Prema propisima (RET) vrijede za transformatore ove tolerancije:

Garancija za:		Dopušteno odstupanje:
Gubitak u praznom hodu		10%
Gubitak u kratkom spoju:	a) u pogonski toplom stanju	15%
	b) preračunat na 75°	10%
Kratkospojni napon		± 10%

B. ASINHRONI STROJEVI

Sastav i način rada. Asinhroni se stroj sastoji od statora i rotora. Jedan i drugi složen je od limova i nosi namote, koji su smješteni u utore. Trofazni stroj ima na statoru trofazni namot, a na rotoru ili također trofazni, ili pak, rjeđe, dvofazni namot. Ovaj vodimo do kliznih koluta. Kavezni motori imaju u utorima rotora vučene ili lijevane štapove, koji su s obje strane rotora prstenima spojeni u jedan ili više kaveza. T. zv. stepenasti rotor ima u sredini još jedan prsten. Oblici presjeka utora i štapova kaveznih rotora vrlo su različiti. Nalazimo okrugle, pravokutne, ovalne i klinaste forme.

Kao materijal za namote statora upotrebljavamo isključivo bakar. Isto vrijedi i za rotore s namotom. Kratkospojne kaveze gradimo, naprotiv, od bakra, bronce, mjedi i lijevana aluminija.

Asinhroni stroj, koji miruje s otvorenim sekundarnim krugom, ponaša se, kad ga priključimo na mrežu, kao transformator u praznom hodu. On uzima struju, koja jako fazno zaostaje. Jalova komponenta ove struje služi za magnetiziranje, dakle za izgradnju magnetskog toka, a djelatna komponenta pokriva gubitke u željezu rotora i statora i male gubitke praznog hoda u bakru. Struja praznog hoda znatno je, međutim, veća nego kod transformatora, jer treba osim željeza magnetizirati i raspor, koji treba za uzbudu mnogo AZ. Iznos joj je cca 20 do 80% nominalne struje.

Voltmetar, priključen na klizne kolute, pokazuje napon, koji je nešto manji nego što odgovara omjeru broja zavoja statora i rotora, uzimajući u obzir spoj i namotne faktore. Frekvencija napona na kliznim kolutima, kad rotor miruje, jednaka je frekvenciji mreže. Bitna je razlika prema transformatoru, što možemo fazni položaj napona na kliznim kolutima zakretanjem rotora po volji mijenjati prema naprijed ili natrag. Na toj osobini zasniva se djelovanje zakretnog transformatora.

Okrećemo li bilo kakvim pogonom rotor, mijenja se napon na kliznim kolutima po veličini i frekvenciji. Kod okretanja u smislu okretnog polja i jedno i drugo opada linearno s klizanjem. Klizanjem nazivamo omjer (sinhrona brzina vrtnje — brzina vrtnje rotora): (sinhrona brzina vrtnje). Obično ga izražavamo u postocima. U sinhronizmu napon i frekvencija rotora postaju jednaki nuli. Zbog zavisnosti o klizanju govorimo o naponu klizanja i frekvenciji klizanja rotora.

Sinhrona brzina vrtnje zavisi o frekvenciji mreže f i broju polova stroja $2p$. Ona je jednaka $(120 \cdot f) : 2p$. Napose kod mreže sa 50 Hz izračunavamo sinhronu brzinu vrtnje motora:

$$n_{sin} = \frac{6000}{\text{broj polova}} \quad \text{okr/min.}$$

Priključimo li na klizne kolute mirnog motora otpornik za pokretanje, uzet će ovaj struju, koja zavisi o naponu mirovanja i o otporu. Ova struja teče kroz vodiče armature, te zajedno s magnetskim tokom izvodi potezni moment. Kad je ovaj veći od protumomenta tereta, motor će se zaletiti. Kavezni motori kreću naravno sami, čim ih priključimo na mrežu. Struja, koju uzimaju, vrlo je visoka, jer se motor, kad miruje, nalazi u kratkom spoju.

U principu možemo ustanoviti, da asinhroni motor može razvijati zaletni moment samo u slučaju, kad se u njegovu sekundarnom krugu troši djelatna snaga. Kod motora s kliznim kolutima zbiva se to najvećim dijelom u vanjskom otporniku za pokretanje, kod kaveznog motora isključivo u

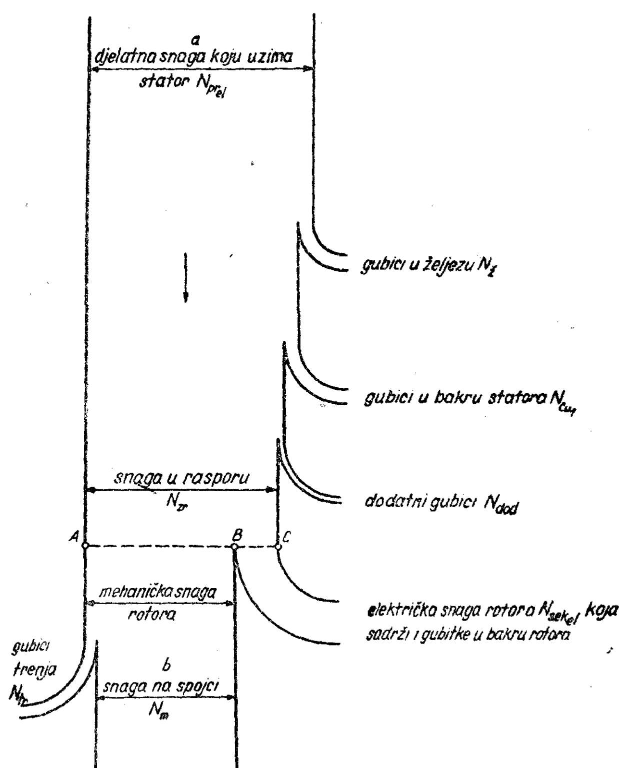
štapovima armature i kratkospojnim prstenima. Kod izvedenog stroja možemo dakle na moment utjecati samo u prvom slučaju. Potezni moment iznosi:

$$M_p = \frac{N_{sek\,el}}{n_{sin}} \cdot 973 \quad \text{mkg},$$

gdje je $N_{sek\,el}$ = električka snaga, koja se troši u sekundarnom krugu u kW,
n_{sin} = sinhrona brzina vrtnje u okr/min.

Čim motor ide, vrijedi druga jednadžba, koja uzima u obzir zavisnost momenta, koji motor razvija kod vrtnje, o klizanju, naime:

$$M = \frac{N_{sek\,el}}{s} \cdot \frac{973}{n_{sin}}, \text{ gdje je } s = \text{klizanje, odnosno } \frac{\text{klizanie u \%}}{100}.$$



Sl 44. Tok djelatne snage u asinhronom motoru. Dužina AC odgovara sinhronoj brzini vrtnje, dužina AB faktičnoj brzini vrtnje, a dužina BC klizanju. Korisnost $\eta = b/a$.

Vidimo, da električka snaga, utrošena na sekundarnoj strani kod vrlo malih klizanja, dakle kod brzina u blizini sinhronizma, uz jednake zakretne momente vrlo naglo pada. U stvari odgovaraju klizanju od 1 do 2% sekundarni gubici u bakru od 1 do 2% nominalne snage. Naprotiv, kad motor

miruje klizanje iznosi 100%, pa treba potrošiti 100% snage u krugu armature, da bismo dostigli zakretni moment od 100% nominalnog momenta.

Sl. 44 prikazuje tok djelatne snage, primljene iz mreže, unutar stroja. $N_{pr_{el}}$ je primljena snaga. Od ove se odvajaju u statoru gubici u željezu i gubici u bakru statora. Možemo uzeti kao da i t. zv. dodatni gubici N_{dod} nastaju također u statoru, ma da oni, kao i gubici u željezu, otpadaju jednim dijelom i na rotor. Kroz raspor prolazi snaga u rasporu N_{zr}, koja je jednaka razlici primljene snage i gubitaka u statoru. Ta se snaga prenosi na rotor, gdje se dijeli u dva dijela. Jedan od njih jednak je električnoj snazi koja se troši u krugu armature $N_{sek_{el}}$, a drugi mehaničkoj snazi N_m, koju daje armatura. Obje stoje u odnosu, koji zavisi samo o klizanju s i ni o čemu više:

$$\frac{N_m}{N_{sek_{el}}} = \frac{1-s}{s},$$

gdje je $$N_m + N_{sek_{el}} = N_{zr} = N_{pr_{el}} - (N_{\check{z}} + N_{Cu_1} + N_{dod}), \text{ te}$$

$$N_m = (1 - s) N_{zr},$$

$$N_{sek_{el}} = s N_{zr}.$$

Ove relacije važne su kod motora s kliznim kolutima, kod kojih reguliramo brzinu vrtnje otpornicima u krugu rotora. Iz njih razabiramo, da bilo koju traženu mehaničku snagu uz klizanje s možemo dobiti samo ukoliko pristanemo na odgovarajuće gubitke u rotorskom krugu.

Snaga, koju motor predaje na osovini, smanjena je, naravno, još za gubitke trenja samog motora.

Upotrebljavamo li asinhroni motor kao pretvarač frekvencije, to je snaga, potrošena u sekundarnom krugu, jednaka nominalnoj snazi pretvarača. Gornje jednadžbe pokazuju onda, da pretvarač moramo dodatno tjerati ili kočiti, čim ga opteretimo. Prvo će biti slučaj, kad pretvaračem povećavamo frekvenciju, kada dakle klizanje postaje veće od 1,0, a posljednje, kada je sekundarna frekvencija manja od frekvencije mreže, t. j. klizanje manje od 1,0.

Imamo li u krugu rotora asinhronog stroja samo otpore, na pr. kad rotor radi u kratkom spoju, tada može sekundarna električka snaga $N_{sek_{el}}$ kada u rotoru teče struja, biti samo pozitivna, jer je jednaka $m_{sek} \cdot I^2_{sek} \cdot R_{sek}$. Ali kako je

$$N_{sek_{el}} = N_{zr} \cdot s$$

to će biti

$$N_{zr} = N_{sek_{el}}/s.$$

Čim klizanje poprimi negativne vrijednosti, mora prema tome snaga N_{zr}, koja, dolazeći od statora, prolazi kroz raspor, postati negativna. To opet znači, da se snaga vraća statoru i time mreži. Asinhroni motor postaje zato

asinhronim generatorom kad prijeđe sinhronizam. Mehanička snaga N postaje također negativna, osovinu treba u slučaju ovakovog rada tjerati izvana. To naravno slijedi i iz principa održanja energije.

Pojimo li rotor asinhronog stroja istosmjernom strujom ili ga, što je rjeđe, priključimo na mrežu konstantne frekvencije, postat će on sinhronim motorom, odnosno sinhronim generatorom. Tada će pokazivati i tipična svojstva ovih strojeva. U posljednjem slučaju govorimo i o dvostruko pojenom stroju, pri čemu je međutim od značenja samo priključak statora i rotora na istu mrežu. Motor tada ide dvostrukom sinhronom brzinom, koju ne mijenja ni kod opterećenja.

a) Trofazni asinhroni motor

Trofazni asinhroni motor najvažniji je pogonski stroj, te je u ispitnoj stanici brojčano na prvom mjestu. Ispitivanje započinje mjerenjem otpora hladnog stroja. Slijedi pokus praznog hoda ili pokus kratkog spoja. Opterećenje snimamo često za vrijeme pokusa zagrijavanja. Pokus zaleta daje nam podatke o poteznom momentu, minimalnom zaletnom momentu i prekretnom momentu, kao i o struji kratkog spoja stroja. Zamašni moment određujemo prilikom zaustavljanja. Naponski pokus među zavojima nadovezujemo na pokus praznog hoda, dok naponski pokus na namotu izvodimo sasvim na kraju.

Kod ispitivanja čitavih serija strojeva jednake izvedbe dovoljno je ispitati točno cca $^1/_4$ do $^1/_5$ svih motora, dok se kod ostalih zadovoljavamo pokusom praznog hoda i kratkog spoja. Prazni hod produžimo u tom slučaju na nekoliko sati.

Pokus praznog hoda. Započinjemo *mjerenjem otpora* statorskog namota. Ako je moguće, mjerimo otpore faza; inače se zadovoljavamo mjerenjem otpora među priključnim stezaljkama. Ovu vrijednost označujemo sa R_{st}. Ona nam omogućuje da izračunamo gubitke u bakru čak i onda, kada ne znamo, da li je namot spojen u zvijezdu ili trokut, budući da ovi iznose $I^2 \cdot 1{,}5 \cdot R_{st}$. Faktične otpore po fazi možemo točno računski odrediti po formulama sa str. 3. Praktički to nikada ne činimo.

Otpor rotora mjerimo samo kod izvedbe s kliznim kolutima. Mjerimo neposredno na kolutima, a ne možda na četkicama ili priključnim stezaljkama. Kod trofaznih motora možemo izmjeriti uvijek samo otpor između kliznih koluta R_{kl}, jer zvjezdište nema izvoda. Samo vrlo veliki motori imaju šest koluta uz otvoreni spoj faza. Otpor kaveznih rotora ne mjerimo.

Kod motora s pokretačem i motora s regulacijom mjerimo zatim prijenos kod mirovanja. Pri otvorenom krugu rotora priključimo stator na puni napon te mjerimo napon među kolutima. Prijenosni omjer je tada:

$$k_{12} = \frac{U_{lin}}{U_{20_{lin}}} = \frac{w_1 \cdot f_{nam_1}}{w_2 \cdot f_{nam_2}} \cdot \left(1 + \frac{\tau_h}{2}\right)$$

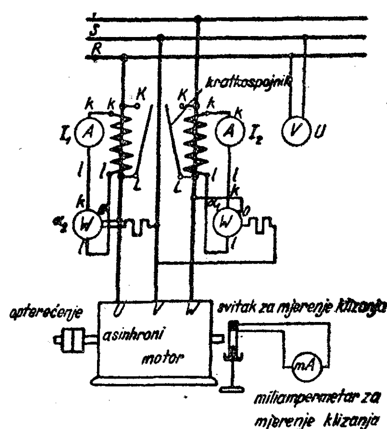
kod motora spojenog zvijezda-zvijezda ili trokut-trokut. Ako je samo jedan namot spojen u zvijezdu, treba uvrstiti njegov broj zavoja pomnožen s $\sqrt{3}$. τ_h je t. zv. Heylandov rasipni faktor stroja, koji se kreće između 0,02 i 0,10. Iz rezultata mjerenja možemo ga izračunati kao:

$$\tau_h = \frac{I_0}{I_{k_i} - I_0},$$

gdje je I_0 = struja praznog hoda uz nominalni napon, I_{k_i} = idealna struja kratkog spoja uz nominalni napon, $\approx I_k/\sin\varphi_k$.

Kako I_0 ne zavisi linearno o naponu statora, to će rasipni faktor, a s time i prijenos, zavisiti o njemu. Najbolje je zato, da mjerimo kod nominalna napona. Prijenos je važna vrijednost, jer predstavlja i omjer (sekundarna struja) prema (primarna struja ^ struja praznog hoda), ako uvrštavamo linijske struje, koje teku u dovodima.

Sada motor potjeramo. Kod rotora s regulatorom i rotora s pokretačem upotrebimo pokretač. Kavezne motore priključimo direktno ili sklopkom zvijezda-trokut na mrežu. Ne možemo li pribaviti potrebnu snagu, koja iznosi 3,5 do 6 puta nominalna prividna snaga (odnosno trećinu od te vrijednosti), potjeramo motor sa sniženim naponom. Sl. 45 prikazuje spoj mjernih instrumenata. Određujemo struju, koju motor uzima I_0, snagu, koju motor uzima N_0 i faktor snage cos φ_0, u zavisnosti o mrežnom naponu U_0, koji mijenjamo. Napon snizujemo do cca jedne trećine nominalne vrijednosti. Brzinu vrtnje neprestano nadziremo. Padne li ova više od 1%, ne treba pokus nastavljati. Kod premalog napona stroj postane nestabilan i gdjekada stane.

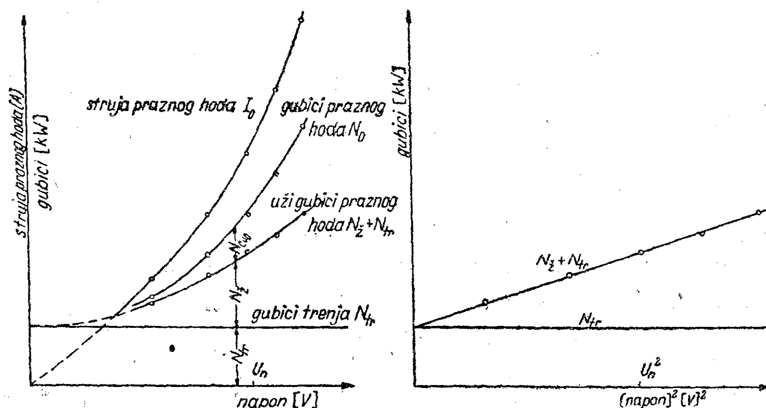


Sl. 45. Spoj mjernih instrumenata kod asinhronog motora. Kod napona iznad 600 V upotrebljavamo naponske mjerne transformatore.

Rezultate mjerenja prikazujemo u obliku karakteristika praznog hoda. U zavisnosti o U_0 nanosimo vrijednosti N_0, I_0 i cos φ_0. Gubitke smanjimo za iznos gubitaka praznog hoda u bakru $1{,}5 \cdot R_{st} \cdot I_0^2$, pri čemu za R_{st} treba uvrstiti hladni otpor. Preostali gubici predstavljaju sumu gubitaka u željezu i gubitaka trenja, koje možemo radvojiti, ako produžimo krivulju do sjecišta s ordinatom. Bolje ćemo dobiti gubitke trenja, ako — prema str. 14 — naneseno gubitke u zavisnosti o kvadratu napona.

Sl. 46 pokazuje kako teku ove karakteristike. Gubici u željezu smanjuju se praktički kvadratično s naponom. Struja praznog hoda mijenja se

poput karakteristike zasićenja, dok cos φ_0 ne prijeđe cca 0,1 do 0,15. Faktor snage raste, kad napon pada. To je zato, što konstantni gubici trenja procentualno sve više iznose, tako da motor, koji radi sa sniženim naponom napokon više i nije u praznom hodu, nego je razmjerno jako opterećen. Ne zaboravimo, da prekretni moment kod 32% napona iznosi samo još 10% normalnog prekretnog momenta.



Sl. 46. Karakteristike praznog hoda asinhronog motora (jako zasićeni stroj velike brzine). Gubici i struja u zavisnosti o naponu (a) i gubici u zavisnosti o kvadratu napona (b).

Protegnemo li pokus praznog hoda vrlo daleko prema dolje, struja praznog hoda će čak opet porasti. Stroj će napokon prijeći u stanje kratkog spoja.

Pokus kratkog spoja. Pokus kratkog spoja izvodimo na jednak način kod svih tipova motora, bilo s pokretačem, regulatorom ili kaveznim rotorom. Rotor zadržavamo polugom, koja je pričvršćena na kraju osovine, a stator priključimo na napon nominalne frekvencije, koji može biti kod manjih strojeva cca 1/3 do 1/4, kod većih strojeva samo 1/6 do 1/3 nominalnog napona. Motore s osobito malom strujom pokretanja, koja je samo 3,5 do 4,5 puta veća od nominalne struje, ispitujemo i kod većih snaga s punim naponom u kratkom spoju. Ako je namot statora u pogonu spojen u trokut, izvodimo često pokus kratkog spoja s nominalnim naponom i statorom spojenim u zvijezdu. To odgovara naponu $U_n/\sqrt{3} = 0{,}577 \cdot U_n$.

Kod pokusa kratkog spoja očitavamo: napon kratkog spoja U_k, struju kratkog spoja iz mreže I_k, snagu, što je motor uzima, N_k, te kod većih motora s kliznim kolutima još i rotorsku struju I_{2k}. Mjerenje treba provesti vrlo brzo, pa je najbolje postaviti više osoba za očitavanje. Istovremeno određujemo zakretni moment, koji možemo mjeriti na polugi i to jedino kod motora s kaveznim rotorom (str. 349). Kako zakretni moment može biti zavisan o položaju rotora, treba rotor zakretati između dva položaja

maksimalnog momenta, koji slijede jedan za drugim, pri čemu mjerimo najveći i najmanji zakretni moment. Ovaj može čak mjestimično biti negativan. Uzmemo srednju vrijednost obih očitanja, odbijemo opterećenje, koje kod mirovanja predstavlja poluga s priborom, pa dobijemo faktični srednji potezni moment ili moment kratkog spoja motora.

U praksi rijetko izvodimo pokus kratkog spoja — ma da se to samo po sebi preporučuje — uz trajno polagano okretanje rotora nasuprot smjeru vrtnje, zbog znatno većih sredstava, koja su za to potrebna. Treba li ipak izvesti pokus u tom obliku, osobito je prikladan uređaj s dinamo-vagom, koju pojimo protustrujom, kako je opisano na str. 26.

Kod ispitivanja više jednakih motora zadovoljavamo se jednim jedinim mjerenjem. Kod pojedinačnih ispitivanja ponavljamo mjerenje s promijenjenim naponom. Počinjemo od najvišeg napona, da bi dodatno zagrijavanje namota tokom daljnjeg mjerenja bilo sve manje. Kod strojeva ispod 50 kW izvodimo cca 3, kod većih do 10 mjerenja.

Kod određivanja cos φ_k ne će biti suvišno slijedeće upozorenje. Faktor snage određujemo, kao što se to uvijek preporučuje, kako iz omjera kW/kVA, tako i iz omjera manjeg i većeg otklona obaju vatmetara (str. 331). Ako sumnjamo, da li je manji otklon pozitivan ili negativan, ne možemo uvijek na temelju izračunatih vrijednosti za cos φ sigurno odlučiti, da li on leži faktično iznad 0,5 ili ispod 0,5. To je moguće samo onda, kad cos φ_k leži iznad 0,55 ili ispod 0,45. U takvu slučaju treba neposredno nakon pokusa kratkog spoja ustanoviti pravi predznak, i to tako, da motor pošto smo skinuli polugu za kočenje, opet potjeramo ne mijenjajući, naravno, ništa na mjernom postavu. Izuzev sasvim posebne slučajeve, u praznom hodu je otklon vatmetra, koji je u pitanju, uvijek negativan. Ako se kazaljka otkloni na pravu stranu, bio je predznak negativan, ako udari na lijevo, bio je naprotiv pozitivan.

Motori s kliznim kolutima imaju većinom cos φ_k manji od 0,5. Otklon jednoga od vatmetara je stoga gotovo uvijek negativan. Isto vrijedi i za velike kavezne motore. Tu je cos φ_k veći nego kod kolutnih motora. Mali strojevi, osobito oni s dvokaveznim rotorom, imaju faktor snage u kratkom spoju između 0,4 i 0,6, dakle upravo u području, u kojemu se mogu kod određivanja lako potkrasti pogreške. O veličini snage, koju motor uzima kod pokusa kratkog spoja možemo se orijentirati prema jednadžbi:

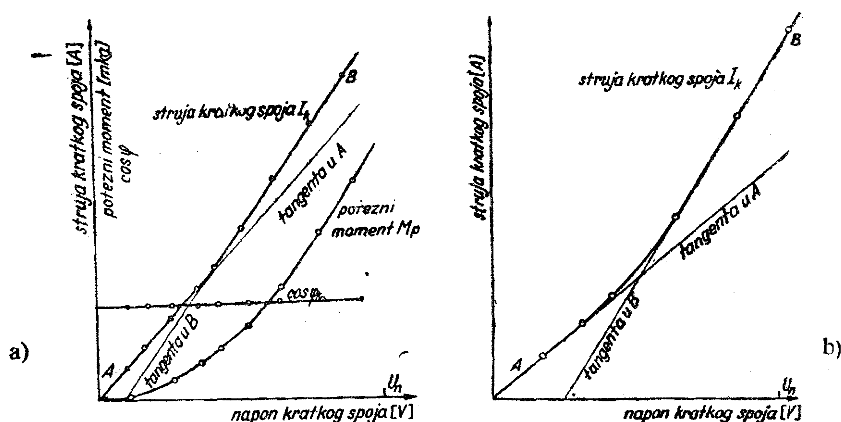
$$N_k = M_p \; n_{sin}/973 + I_k^2 \cdot 1{,}5 \cdot R_{st}/1000 \qquad \text{kW},$$

gdje je M_p potezni moment.

Obrnuto možemo prema toj jednadžbi kontrolirati zakretni moment.

Rezultate pokusa kratkog spoja prikazujemo, prema sl. 47, u obliku krivulja, i to tako, da u zavisnosti o naponu nanosimo struju I_k, faktor snage cos φ_k, i potezni moment M_p, te eventualno struju rotora I_{2k}. Snaga krat-

kog spoja normalno nam nije više potrebna. Ne možemo je upotrebiti, da bismo odredili dodatne gubitke, pa je zato i ne unosimo uvijek u dijagram. Najviše nas zanima kod kaveznih motora krivulja struje kratkog spoja, jer vrijednost uklopne struje, koja je često garantirana, možemo odrediti često samo tako, da produžimo ovu krivulju izvan mjerenih točaka. U početku teče ona kod manjih napona linearno, i nastavlja tako kod slabo ili umjereno zasićenih strojeva sve do puna nominalnog napona. No jače zasićeni



Sl 47. Karakteristike kratkog spoja asinhronog motora. (Zasićenje rasipnih putova opaža se normalno (a) i jako (b).)

motori pokazuju jače ili slabije skretanje krivulje prema vrijednostima struje koje rastu više nego linearno s naponom, tako da prava vrijednost pune struje kratkog spoja može ležati 10 do 20%, u krajnjem slučaju čak i do 50% više od linearno preračunatog iznosa. Razlog je tome jako zasićenje statorskih zubi između faza, te glava rotorskih zubi pri razmjerno uskom otvoru utora. Kad se ovi dijelovi na rasipnom putu jako zasite, djeluju kao zračni raspori, i krivulja struje kratkog spoja teče opet linearno, no znatno strmije. U praksi uzimamo to u obzir tako, da zadnji dio krivulje produžimo pravcem, te ekstrapoliramo struje kod viših napona prema tome produženju. Možemo se također pomoći upotrebom dvostruko logaritamskog papira, na kojemu mjerene točke često leže gotovo na pravcu. Produživanjem ovoga do nominalnog napona dobivamo, istina, gdjekada prevelike struje.

Izmjerenu struju kratkog spoja ne smijemo zamijeniti s t. zv. *idealnom strujom kratkog spoja,* koju bismo dobili, kad bi djelatni otpori statorskog i rotorskog namota bili nula. Ova struja I_{ki} uvijek je veća od I_k, i možemo je vrlo približno računati:

$$I_{ki} = I_k / \sin \varphi_k \quad \text{kod struje praznog hoda iznad } 0{,}40 \cdot I_n,$$

ili točnije:

$$= \frac{I_k}{\sin\varphi_k} \cdot \left[\frac{1 - \frac{I_o}{I_k} \cdot \sin\varphi_k}{1 - \frac{I_0}{I_k \cdot \sin\varphi_k}} \right]$$

kod struje praznog hoda iznad $0{,}40 \cdot I_n$.

Uobičajeno je, da struju kratkog spoja navodimo kao višekratnik nominalne struje, pa i kod grafičkog prikazivanja rado odabiramo odgovarajuće mjerilo. Kako su ove relativne vrijednosti za slične strojeve često poznate, daju nam one dobru sliku o normalnom ili odstupajućem ponašanju ispitivanog motora, ili pak ukazuju na učinjenu pogrešku kod mjerenja.

Relativne struje kratkog spoja kod motora s kliznim kolutima iznad 500 okr/min dosižu peterostruku do osmerostruku, a ispod 500 okr/min 3,5-struku do peterostruku nominalnu struju. Motori s jednostrukim kavezom iz okruglih štapova imaju nešto manje struje kratkog spoja, a za t. zv. industrijske rotore s dvostrukim kavezom ili s izrazitim potiskivanjem struje vrijednosti dosižu 3,5-struku do 4,5-struku nominalnu struju. Struja kratkog spoja općenito ne smije pasti ispod 3,5-struke nominalne struje, jer u protivnom slučaju prekretni moment ne bi više bio dovoljno velik. Taj treba da dosiže 1,6-struki nominalni zakretni moment.

Rezultate mjerenja u kratkom spoju preračunavamo na druge napone u principu za struje linearno, a za zakretne momente i snage kvadratično s naponom. Faktor snage se ne mijenja. Kod preračunavanja rezultata dobivenih kod spoja u zvijezdu na spoj u trokut treba još pomnožiti sa 3. Pri tome razumijevamo pod strujom mrežnu struju, dakle ne faznu struju unutar trokuta. Vrijede dakle slijedeći odnosi kod preračunavanja na napon U:

$$I_k = I_{k_{mjer}} \cdot U/U_{mjer}, \qquad M_p = M_{p_{mjer}} \cdot U^2/U^2_{mjer},$$
$$N_k = N_{k_{mjer}} \cdot U^2/U^2_{mjer}$$

ako ne mijenjamo spoj. Kod preračunavanja pokusa u spoju zvijezda na spoj u trokut upotrebljavamo općenito jednadžbe:

$$I_\Delta = I_\lambda \cdot 3 \cdot U_\Delta/U_\lambda, \quad M_\Delta = M_\lambda \cdot 3 \cdot U_\Delta^2/U_\lambda^2, \quad N_\Delta = N_\lambda \cdot 3 \cdot U_\Delta^2/U_\lambda^2,$$

a specijalno kod preračunavanja od zvijezde na trokut uz isti napon vrijede relacije:

$$I_\Delta = 3 \cdot I_\lambda, \quad M_\Delta = 3 \cdot M_\lambda, \quad N_\Delta = 3 \cdot N_\lambda.$$

Veličina struje kratkog spoja zavisi o magnetskoj vodljivoj vrijednosti rasipnih putova. Što je bolja ova vodljiva vrijednost, to će manje biti struje kratkog spoja uz isti narinuti napon. Magnetske silnice u kratkom spoju

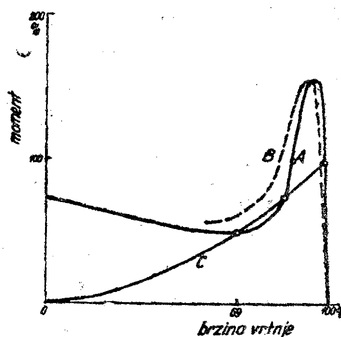
prolaze uglavnom popreko kroz statorske utore, uokolo oko glava namota statora i rotora i popreko kroz rotorske utore. Nekoliko silnica prelazi od statora kroz raspor u rotor, no nisu korisno ulančene. Kao vodljiva vrijednost za rasip u utorima statora i rotora dolazi u obzir omjer visine utora prema širini utora. Uski i visoki utori smanjuju dakle struju kratkog spoja. Osobito duboki otvori utora, koje nazivamo i rasipnim utorima, još je dodatno smanjuju. Dugačke glave namota povećavaju rasip u glavama namota, koji se može još znatno povećati zbog blizine magnetičnog željeza. Rasip u rasporu, koji nazivamo dvostruko ulančenim rasipom, smanjuje se, kad povećavamo raspor, a prije svega, kad broj utora raste. Razabiramo, da je tek u umjerenim granicama moguće naknadno povećati struju kratkog spoja, što se na pr. može pokazati potrebnim u cilju povećanja prekretnog momenta ili poteznog momenta. Praktički dolazi u obzir samo proširivanje otvora na rotorskim utorima i povećanje raspora tokarenjem rotora kod strojeva sa vrlo malo utora po polu i fazi. Ako se pak kod ispitivanja pokaže, da struja kratkog spoja odstupa u usporedbi s onom kod jednakih motora, to treba istražiti prostor oko glava namota i kratkospojnih prstena, nisu li odviše blizu smješteni željezni dijelovi, osobito željezni pokrovni limovi i ventilacioni zasloni, koji mogu jako utjecati na struju kratkog spoja.

Zakretni moment u kratkom spoju možemo bez većih preinaka povećati u širim granicama nego struju. U principu dovodi do cilja svako povećanje otpora rotora. Kod rotora s jednostrukim kavezom možemo to postići, ako odtokarimo kratkospojne prstene. Ne treba međutim zaboraviti, da istovremeno povećavamo gubitke u bakru kod opterećenja i time pogoršavamo korisnost.

Posebna su razmatranja potrebna kod dvokaveznog motora. Na sl. 50 vidimo strujni dijagram ovog motora. Velika vanjska kružnica bi vrijedila, kad bi postojao samo gornji kavez, a mala unutarnja, kad bi djelovao samo donji kavez. Ovaj je kavez smješten dublje, pa ima veći rasip zbog dugačkog grla utora, i zato manju struju kratkog spoja. U stvari djeluju oba kaveza zajedno. Točka kratkog spoja leži između obje kružnice, i to na trećoj, maloj kružnici, koja dodiruje veću. Ona se pomiče po ovoj nalijevo, kad donji kavez zbog smanjenog otpora djeluje jače, a nadesno, kad smanjimo otpor gornjeg kaveza. Obratno možemo dakle reći, da će tokarenje gornjeg prstena točku kratkog spoja pomaknuti nalijevo, a tokarenje donjeg prstena nadesno. Prema tome, da li točka leži na lijevoj ili na desnoj polukružnici, jedna te ista mjera povećavat će zakretni moment ili će ga smanjivati. Vrlo velike struje kratkog spoja uz premale potezne momente ukazuju kod dvokaveznih motora na premali otpor gornjeg kaveza. To se može dogoditi na pr. kod upotrebe materijala prevelike vodljivosti, dakle

kod ugradnje štapova od bakra umjesto od bronce ili mjedi. Otkrit ćemo to ispitivanjem specifičnog otpora.

Povećanje prekretnog klizanja motora može biti potrebno, kad je prekretni moment doduše dovoljno velik, ali nastupa tek kod brzine vrtnje, koja je odviše velika. Sl. 48 prikazuje takav slučaj, gdje protumoment centrifugalnog kompresora neposredno prije prekretnog klizanja postaje veći od momenta motora. Vidimo, da motor kod zaleta mora zapeti. U ovom slučaju dovelo bi povećanje prekretnog momenta naravno također do cilja, no ono je moguće tek u umjerenim granicama spomenutim već povećanjem zaletne struje. Tu pomaže povećanje prekretnog klizanja zbog povećanja rotorskog otpora. Na osnovu nacrtanih krivulja ustanovimo, za koliko treba povećati prekretno klizanje, da bi krivulja motora sigurno ležala iznad krivulje protumomenta. Tada treba prstene ili čak i štapove toliko obraditi, da dobijemo odgovarajuće povećanje otpora. Nova krivulja momenta teći će, kako je na slici crtkano označeno. Budući da se normalni gubici u rotoru povećavaju u istom omjeru kao i prekretno klizanje, snizit će se korisnost zamjetljivo, što treba unaprijed točno ocijeniti.



Sl. 48. Povećanje prekretnog klizanja povećanjem gubitaka u rotoru, da bismo spriječili da motor, koji opterećen kreće, zapne kod 69% nominalne brzine vrtnje. Krivulja A: prvobitna karakteristika zakretnog momenta motora, krivulja B: promijenjena karakteristika zakretnog momenta motora, krivulja C: protumoment opterećenja (ventilator).

Gdjekada se traži podatak o momentu udarnog kratkog spoja asinhronog motora. Ovaj se moment pojavljuje u prvom času nakon uklapanja kao moment, koji pulzira u oba smjera, te iščezava vrlo brzo zbog prigušnog djelovanja rotorskog namota. O veličini rotorskog otpora ne zavisi. Kako nema prikladna postupka, kojim bismo ga eksperimentalno odredili, to ga izračunavamo:

$$M_{ud} = \pm M_n \cdot \frac{I_k}{I_n \cdot \cos\varphi_n}.$$

Udarni moment odnosi se dakle prema nominalnom momentu kao struja kratkog spoja prema djelatnoj komponenti nominalne struje.

Pokus zaleta. Pokus kratkog spoja, kod kojega stroj stoji ili se vrlo polako okreće, često upotpunjujemo pokusom zaleta, kod kojega oscilografski snimamo brzinu vrtnje, struju i napon stroja, koji neopterećen kreće. Kao što je u I. dijelu pod G detaljno izvedeno, daje nam ovaj pokus ne samo točnu vrijednost struje i momenta kratkog spoja uz puni ili tek malo smanjeni napon, nego i sve ostale vrijednosti u zavisnosti o brzini

vrtnje praznog hoda. Iz krivulje zakretni moment - brzina vrtnje, koju je grafički lako dobiti, uzimamo potezni moment, koji se zove još i moment mirovanja ili uklopni moment, zatim minimalni zaletni moment i približno prekretni moment. Minimalni zaletni moment je najmanji zakretni moment, što ga motor razvija prije prekretnog momenta. Ovaj dakle ne smije biti manji od protumomenta opterećenja, koji treba svladati u pogonu. Prekretni moment doseći će motor kod cca 90% brzine vrtnje praznog hoda.

Nepovoljna krivulja polja i nepovoljan broj utora armature mogu biti razlog, da nastanu sedla u krivulji zakretni moment - brzina vrtnje, koja otežavaju ili čak onemogućuju zalet opterećenog motora, kad je protumoment veći od vrijednosti sedla. Određivanje ovakvih sedla iz krivulje zaleta ponešto je nesigurno, pa se zato kod točnijih ispitivanja preporučuje ispitati krivulju momenta točku po točku dinamo-vagom. Jaka sedla postoje onda, kad motor ne kreće sigurno ili ako kod bilo koje brzine zapne. U tom slučaju potrebne su na motoru promjene.

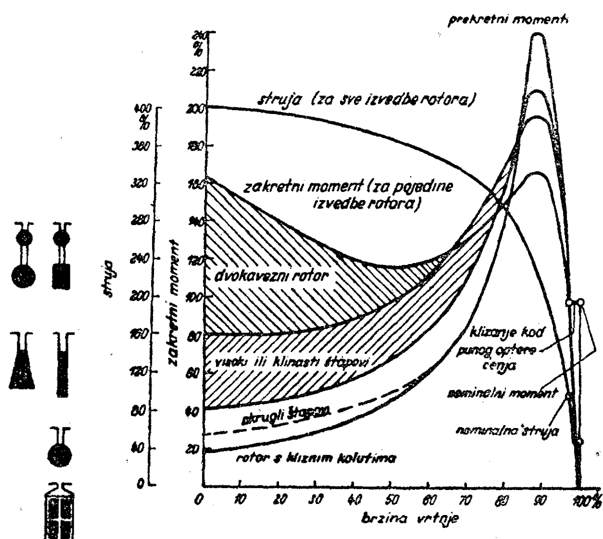
Kako je ukupno trajanje zaleta mjera za srednji zakretni moment, uz poznat zamašni moment stroja, koji neopterećen kreće, ili grupe strojeva, možemo ovo trajanje kod ispitivanja međusobno jednakih motora uzeti kao usporedbenu vrijednost, te na taj način uštedjeti ponovno oscilografsko ispitivanje. Ako trajanje zaleta iznosi T_0 sek, brzina vrtnje u praznom hodu n_0 okr/min i zamašni moment GD^2 mkg, bit će srednji zakretni moment u mkg:

$$M_{sr} = \frac{GD^2 \cdot n_0}{375 \cdot T_0}.$$

Trajanje zaleta mijenja se proporcionalno sa zamašnim momentom.

Krivulja struje kratkog spoja u zavisnosti o brzini vrtnje vrlo je slična za različite izvedbe kaveznog rotora, dok je oblik krivulje momenta za svaku od tri osnovne vrste rotora posve karakterističan. Na sl. 49 prikazane su takve krivulje, i to uspoređeni su međusobno motori s jednakim strujama kratkog spoja. Najmanji potezni moment ima prema tome rotor s kliznim kolutima. Neposredno iznad toga leži rotor s jednostrukim kavezom, gdje zbog potiskivanja struje dolazi u štapovima tek do razmjerno malog povećanja otpora. Znatno veće momente od mirovanja do prekretnog momenta imaju pravi rotori s potiskivanjem struje, s pravokutnim ili klinastim presjekom štapova. Najveći potezni moment i zaletni moment ima dvokavezni rotor. Prikazano je čitavo područje, unutar kojega mogu ležati karakteristike momenta, prema tome, kako je otpor štapova podijeljen na gornji i donji kavez. Važna je činjenica, da svako povećanje poteznog momenta nužno dovodi do pogoršanja prekretnog momenta, nominalnog faktora snage i korisnosti motora, kao što se vidi sa dijagrama na sl. 49.

Pokus opterećenja. Ponašanje opterećena asinhronog stroja možemo jedino kod motora s kliznim kolutima dovoljno točno razabrati iz kružnog dijagrama, koji možemo konstruirati iz samih rezultata pokusa praznog hoda i kratkog spoja. I motori s kaveznim rotorom s okruglim štapovima, kod kojih su dakle pojave potiskivanja struje kod mirovanja tek neznatne, imaju također kružni dijagram, koji možemo približno ispravno nacrtati, i s kojega možemo očitati točke za djelomično opterećenje, puno optere-



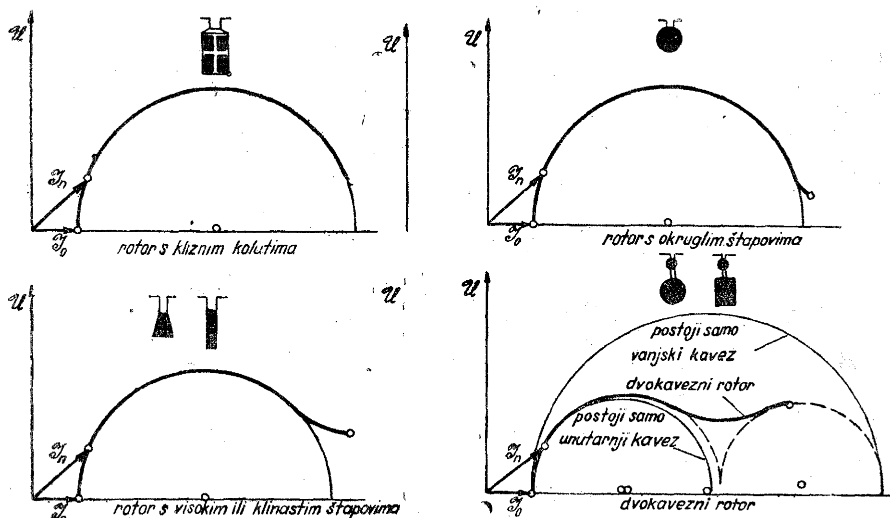
Sl. 49. Zakretni moment i struja u zavisnosti o brzini vrtnje kod različitih vrsta rotora, ali uz istu veličinu motora, istu zaletnu struju i iste gubitke u rotoru kod nominalnog opterećenja. Prekretni moment se smanjuje, kad se potezni moment povećava.

ćenje i preopterećenje. Kod ostalih strojeva, koji danas često dolaze na ispitivanje upućeni smo gotovo isključivo na direktna očitavanja opterećenja. U praksi poduzimamo to kod svih motora, to više što kod pokusa zagrijavanja ima uvijek za to prilike. U najmanju ruku očitamo točku nominalnog opterećenja, no većinom promatramo još i čitav niz točaka djelomičnog opterećenja, i jednu ili dvije točke preopterećenja. Očitavamo: napon mreže, prema potrebi frekvenciju mreže, struju, koja teče iz mreže, primljenu snagu, brzinu vrtnje i kod velikih strojeva s kliznim kolutima rotorsku struju. U tu svrhu najbolje je upotrebiti instrument s vrućom žicom.

Klizanje, koje spada među najvažnije veličine opterećenog asinhronog motora, jer su gubici u bakru rotora s njim čvrsto povezani, određujemo direktnim izbrojavanjem frekvencije ili brzine vrtnje klizanja. Jedino kod vrijednosti iznad 6% određujemo ga iz brzine vrtnje motora, koju mjerimo tahometrom.

Kao mjerilo frekvencije klizanja upotrebljavamo osjetljivi instrument sa zakretnim svitkom bilo koje točnosti, koji priključimo ili na kratko spojene klizne kolute ili na stezaljke t. zv. svitka za mjerenje klizanja. U prvom slučaju dovoljan je sam po sebi vrlo mali pad napona u kratkospojnoj vezi, da bi dao otklon na instrumentu. Frekvencija pada napona jednaka je frekvenciji klizanja te je jednaka broju otklona na jednu stranu u sekundi.

Svitak za mjerenje klizanja sastoji se na pr. od prstenasta svitka sa cca 700 zavoja okrugle žice 1 mm debele, koji ima srednji promjer zavoja 60 cm. Svitak primaknemo aksijalno tik do stroja. Možemo ga upotrebiti



Sl. 50. Strujni dijagrami asinhronog motora uz istu struju kratkog spoja i različite izvedbe rotora. (Povećanje poteznog momenta uzrokuje manji cos φ i manji prekretni moment).

u svim mogućim slučajevima, kod ispitivanja otvorenih i zatvorenih motora, i to bilo onih s kliznim kolutima, bilo kaveznih. Priključeni instrument sa zakretnim svitkom otklanja se lijevo i desno u taktu frekvencije klizanja. Otklone brojimo samo na jednu stranu, a počnemo brojiti s nulom. Bez daljnjeg računanja dobivamo kod frekvencije mreže 50 Hz klizanje u postocima, kad izbrojimo otklone kroz 20 sek i taj broj podijelimo sa 10. Ako smo na pr. izbrojili u 20 sek 33 otklona, to će klizanje motora za 50 Hz biti 3,3%.

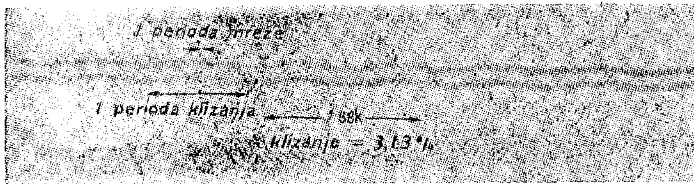
Uz bilo koju frekvenciju mreže f brojimo otklone na jednu stranu kroz $1000/f$ sek, te dobivamo opet klizanje u postocima, kad podijelimo broj otklona sa 10. Pokaže li na pr. instrument kod stroja za 40 Hz kroz $1000/40 = 25$ sek 43 otklona, to je klizanje 4,3%.

To je, naravno, samo postupak, koji u praksi rado upotrebljavamo, a klizanje možemo sasvim općenito izračunavati, ako izbrojimo u mjerenom vremenu T sek n otklona na jednu stranu uz frekvenciju mreže f:

$$s\,\% = \frac{n \cdot 100}{T \cdot f},$$

pri čemu se sjetimo, da je n/T frekvencija klizanja.

Djelovanje svitka za mjerenje klizanja zasniva se na tom, što u njemu induciraju napone rasipna polja, što izlaze iz stroja. Zapravo bismo očekivali samo inducirani napon frekvencije mreže. Dio motora priključen na mrežu je stator, i kao takav miruje relativno prema svitku, a u statoru se mogu pojaviti rasipna polja sigurno samo s frekvencijom mreže. Rasipna polja rotora sastavljaju se u neku vrstu okretnog rasipnog polja, koje se pojavljuje s frekvencijom klizanja plus frekvencija brzine vrtnje, dakle također s frekvencijom mreže. U stvari pokazuje oscilografski snimak napona induciranog u svitku, reproduciran na sl. 51, frekvenciju mreže kao i



Sl. 51. Oscilogram napona induciranog u svitku za mjerenje klizanja

superponiranu frekvenciju klizanja. Ovu induciraju lokalna izmjenična rasipna polja rotorskog namota, koja se ne sastavljaju u okretno polje. Priključeni instrument sa zakretnim svitkom reagira na visoku frekvenciju jedva primjetljivim titranjem kazaljke, no polagane titraje slijedi vidljivim otklonom.

Otklone možemo s nešto vježbe brojiti do 3 u sekundi ili 60 u 20 sekunda. Preko toga brojenje postaje vrlo teško, a rezultat zbog toga nesiguran. U takvu slučaju, dakle kad klizanje leži iznad 6%, služimo se tahometrom. Kako ovi instrumenti većinom griješe za konstantnu vrijednost, možemo tu pogrešku u rezultatu izbjeći tako, da očitamo razliku brzine vrtnje u praznom hodu i kod opterećenja, te ovu uzmemo kao brzinu vrtnje, kojom motor kliže. Pokazuje li na pr. instrument kod četveropolnog stroja i 50 Hz u praznom hodu 1510 okr/min, a kod opterećenja 1410 okr/min, to motor kliže sa 1510 — 1410 = 100 okr/min. Odavle dobivamo klizanje u postocima:

$$\text{klizanje u } \% = \frac{\text{razlika brzine vrtnje praznog hoda i opterećenja}}{\text{sinhrona brzina vrtnje}} \cdot 100$$

$$s\,\% = \frac{n_{sin} - n}{n_{sin}} \cdot 100,$$

dakle u odabranom primjeru $s\,\% = 100 \cdot 100/1500 = 6{,}67\%$. Pretpostavlja se kod ovog mjerenja, naravno, da motor u praznom hodu ide zaista sinhrono, što je kod svih ne premalih motora praktički ispunjeno.

Optičko određivanje klizanja tek vrlo rijetko primjenjujemo u praksi kod ispitivanja asinhronih motora, izuzev kod onih vrlo male snage, jer zahtijeva znatno više sredstava. Zasniva se na t. zv. stroboskopskom principu, prema kojemu oko promatrača vidi rotirajuće gibanje — kod rasvjete, koja se trenutačno pali točno u taktu ili gotovo u taktu brzine vrtnje ili višekratnika ove — kao mirovanje ili sasvim polaganu pojavu gibanja. Da bismo izveli pokus, narišemo na kraju osovine ili na nasađenoj ploči na svijetloj pozadini crnu crtu od središta do oboda. Rasvjetu daje u najjednostavnijem slučaju neonka, priključena na mrežu, koja poji motor. Ova svijetli u taktu priključene frekvencije, ako ima jednu malu i jednu veliku elektrodu, t. j. 50 puta u sekundi na mreži od 50 Hz. Žarulja će osvjetljivati dvopolni motor, koji ide sinhrono uvijek točno nakon jednog punog okretaja, pa će se crna crta pojavljivati uvijek na istom mjestu i prividno će mirovati. Kliže li motor na pr. sa 1/100 svoje sinhrone brzine vrtnje, to crta kod svakog novog osvjetljenja nije dovršila upravo još 1/100 punog okretaja, t. j. oko će je vidjeti, kako zaostaje za taj iznos u smjeru protivnom od smjera vrtnje. Kako se to ponavlja svaki put, kad neonka zasvijetli, nastaje utisak kao da crta polagano rotira nasuprot pravom smjeru vrtnje. Prebrojimo li taj broj okretaja uz pomoć stop-ure i preračunamo ga na 1 min, znat ćemo broj okretaja na minutu, kojim motor kliže. Ako motor ima više od dva pola, vidimo u sinhronizmu, umjesto jedne jedine, toliko crta, koliko ima pari polova, t. j. vidimo zvijezdu s *p* zraka. U slučaju klizanja, ova rotira također unatrag, te možemo brzinu vrtnje klizanja u okr/min mjeriti na isti način, samo što treba kod provođenja pokusa promatrati zaista broj okretaja zvijezde, a ne možda pojedinih zraka pokraj vanjske stalne značke. Klizanje u postocima dobivamo:

$$\text{klizanje u } \% = \frac{\text{broj okretaja zvijezde} \cdot 6000}{\text{vrijeme mjerenja u sek} \cdot \text{sinhrona brzina vrtnje}}.$$

Upotrebljavamo li za rasvjetu neonku s dvije jednako formirane elektrode ili žarulju s tankom niti, svijetlo će sinuti toliko puta u sekundi, koliko puta se mijenja polaritet mreže. Svjetiljke se pale s dvostrukom frekvencijom mreže, dakle 100 puta u sekundi na mreži 50 Hz. Posljedica je toga, da nam se čini, kao da je broj zraka udvostručen. Vidimo dakle točno toliko zraka, koliko motor ima polova. Ako i u ovom slučaju određujemo samo broj okretaja čitave zvijezde, ne mijenja se ništa od onoga, što smo prije rekli. No broj prolaza pojedinih zraka pokraj čvrste značke čini se kao da je podvostručen, pa je stoga najbolje da u svim slučajevima stroboskopskog mjerenja promatramo zvijezdu kao cjelinu.

Udobnije je doduše što prolaz pojedinih zraka u sekundi kod osvjetljivanja frekvencijom mreže daje neposredno frekvenciju klizanja. Kod osvjetljivanja dvostrukom frekvencijom mreže dobivamo međutim dvostruku vrijednost. Kako kod zatvoreno isporučenog rasvjetnog uređaja nije uvijek poznat omjer broja osvjetljenja prema frekvenciji mreže, izbjegavamo radije nesigurnost kod određivanja frekvencije klizanja, te radije određujemo brzinu vrtnje klizanja.

Za rasvjetu dolaze u obzir i posebno pojene živine svjetiljke, koje pri najkraćem vremenu osvjetljenja daju izvanredno jaku svjetlost, tako da kod najjačeg dnevnog svijetla dobivamo oštre slike rotirajućih dijelova (stroboskop s bljeskovima).

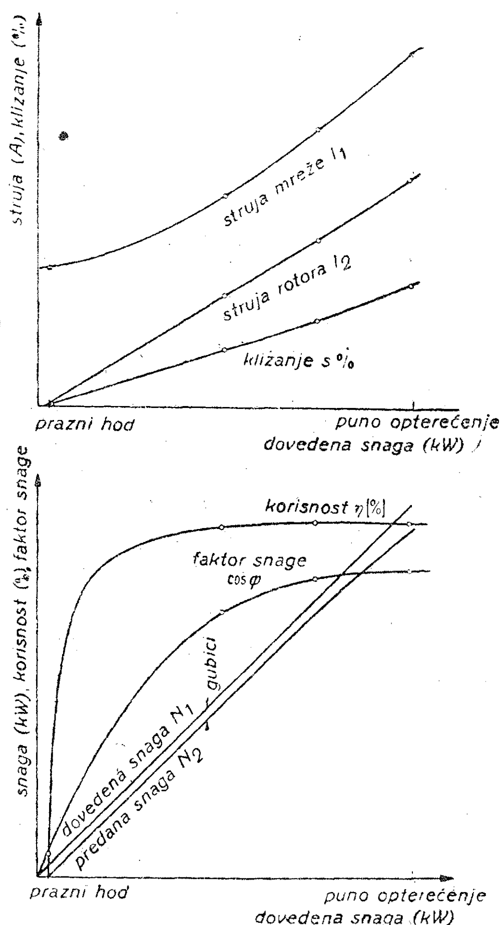
U posebnim slučajevima ima stroboskopska metoda velikih prednosti, i to onda kada treba određivati brzinu vrtnje najmanjih motora s velikim klizanjem ili s regulacijom, koji ne mogu podnijeti opterećenje priključenim tahometrom. Svjetiljku pojimo frekvencijom, koju možemo regulirati, a koju uzimamo ili iz generatora promjenljive brzine vrtnje, koju možemo mjeriti, ili iz titrajnog kruga. Frekvenciju udesimo tako, da se zvijezda zraka zaustavi. Omjer faktične brzine vrtnje prema frekvenciji osvjetljivanja prikazan je onda cijelim brojem. Koji omjerni broj dolazi u obzir, kazuje nam razmatranje, prema kojemu brzina vrtnje motora mora ležati u blizini moguće brzine vrtnje, na pr. kod asinhronog motora ispod sinhrone brzine vrtnje.

Čisto mehanički određujemo brzinu vrtnje vrlo točno primjenom mjerila frekvencije s jezičcima, koje postavimo na temeljnu ploču motora. Frekvencija jezičca, koji titra, pomnožena sa 60, daje brzinu vrtnje motora.

Tokom snimanja opterećenja promatramo nadalje čisto *mehaničko ponašanje* stroja, osobito u pogledu zagrijavanja ležaja, mirna mehaničkog hoda i proizvođenja šuma. Ovo posljednje može se kod asinhronih motora očitovati kao brujanje ili nesnosno zavijanje kod opterećenja. Brujanje opažamo većinom već u praznom hodu, i često potječe od malih nesimetrija raspora ili labavog dosjeda limova ili zaštitnih kapa, koje vibriraju, dok zavijanje nastupa kao posljedica nadvalova u polju, koji se pojavljuju kod opterećenja zbog nezgodno odabranog broja utora rotora.

Karakteristike opterećenja. Rezultate mjerenja nanosimo, prema sl. 52, kao t. zv. *karakteristike opterećenja.* Pojedine veličine prikazujemo u zavisnosti o primljenoj snazi, jer smo ovu direktno mjerili, a možemo je obično i kod kasnijih ispitivanja na licu mjesta očitati na vatmetru u dovodu do motora. Kad bismo odabrali predanu snagu, imalo bi to manu, što bi trebalo ovu prvo odrediti preko korisnosti, da bismo mogli prikazati rezultate. Kod upotrebe dinamo-vage za opterećenje određujemo predanu snagu zajedno s ostalim veličinama već za vrijeme pokusa, no zbog jedinstvenog prikazivanja, treba i u ovom slučaju polaziti od primljene snage iz

mreže. Jedino kod motora, kojima brzinu vrtnje reguliramo daleko prema dolje, odabiramo zakretni moment na osovini kao nezavisnu varijablu, da bismo dobili pregledne krivulje. Uz oznaku napona i frekvencije mreže prikazujemo: mrežnu struju, faktor snage i klizanje. Većinom to upotpunjujemo krivuljama korisnosti, predane snage i brzine vrtnje. Rjeđe ucrtavamo još i struju rotora. Preporučuje se, da crtamo u više dijagrama, jer bi istovremena reprodukcija svih ovih krivulja znatno smanjila preglednost. Dobru podjelu predstavlja struja, klizanje i brzina vrtnje u jednom, a faktor snage, korisnost i korisna snaga u drugom dijagramu. Prikažemo li u posljednjem dijagramu primljenu snagu u zavisnosti o samoj sebi, t. j. unesemo li pravac, koji prolazi kroz nulu i ide uz uobičajeno jednako mjerilo za ordinatu i apsisu pod 45°, dobit ćemo dobar pregled ukupnih gubitaka. Ovi odgovaraju razlici ordinata primljene i predane snage. U početku teku obje linije gotovo paralelno, a kad opterećenje raste, odvaja se linija korisne snage sve jače. Odavle vidimo, kako kod malih opterećenja jače utječu konstantni gubici praznog hoda, dok kod velikih opterećenja sve više utječu teretni gubici, koji rastu kvadratično. Osim toga možemo brzo odrediti međuvrijednosti za korisnost iz omjera udaljenosti obiju linija od nul-linije.



Sl. 52. Karakteristike opterećenja asinhronog motora

Većinom nanosimo samo grane krivulja, koje vrijede za normalna radna stanja od brzine vrtnje praznog hoda do punog opterećenja. To je područje stabilnog rada motora. Katkada međutim ispitujemo asinhroni stroj još i preko prekretne točke ili pak uzimamo te veličine s kružnog dijagrama. Sve krivulje pokazuju onda povratne grane, jer snaga iz mreže iza maksimalne vrijednosti opet opada. Korisnost, faktor snage i korisna snaga pokazuju

izrazite maksimume. Samo mrežna struja i klizanje još i dalje rastu, dok motor ne stane. Ovakvo potpuno prikazivanje upotrebljavamo kod praktičkog ispitivanja tek iznimno. Kočimo li motor iz posebnih razloga u čitavom području brzine vrtnje, bolje je nanositi veličine u zavisnosti o brzini vrtnje, kao što je to na pr. uvijek uobičajeno kod razrade pokusa zaleta.

Pokus trajnog rada sa svrhom da odredimo zagrijavanje, izvodimo po mogućnosti kod punog napona, nominalne struje i nominalne frekvencije. O izvođenju i razradi vrijede podaci iz I. dijela pod E. Kod većih motora izvodimo pokus zagrijavanja, ukoliko ispitujemo dva potpuno ili približno jednaka stroja, često metodom povratnog rada. Motor, koji ispitujemo, priključen je na mrežu nominalne frekvencije i goni drugi motor. Ovaj je priključen na mrežu manje frekvencije, koju poji pretvarač promjenljive brzine vrtnje. Frekvenciju smanjujemo tako dugo, dok ne bude prvi stroj potpuno opterećen. Drugi radi s nešto manjom snagom kao asinhroni generator.

Da bismo odredili graničnu snagu u pogledu zagrijavanja, izvodimo često više pokusa s različitim strujama i različitim naponima na stezaljkama.

Preveliko ugrijavanje u rotoru, osobito u željezu rotora, ukazuje kod kaveznih motora često na prevelike dodatne gubitke praznog hoda. Ovi se kod mjerenja pokazuju kao gubici u željezu pa ih ne možemo primjetiti po povećanom klizanju, a pojavljuju se na pr. kad štapovi rotorskog kaveza leže previsoko. Katkada to opažamo kod lijevanih ili štrcanih aluminijskih rotora, kod kojih treba zato istrugati otvore utora. I rotori s okruglim ili visokim štapovima od bakra pokazuju također vrlo velike gubitke u željezu, kad gornja zona štapova leži tik do oboda rotora ili je uvučena manje od 1 mm. Ovi gubici praznog hoda porastu vrlo jako kad stator ima usto otvorene utore. Kod gotova stroja još je uvijek moguće poboljšanje, ako izglođemo gornji dio štapova za nekoliko milimetara.

U I. dijelu pod E istaknut je također nepovoljan utjecaj, ako nema ventilacionih zaslonâ ili ako su smješteni predaleko od ventilatora.

Korisnost asinhronih motora određujemo kod praktičkog ispitivanja strojeva isključivo metodom pojedinačnih gubitaka. U svrhu istraživanja, a osobito kod istraživanja o faktičnoj veličini dodatnih gubitaka, primjenjujemo i direktne metode uz pomoć dinamo-vage ili kalorimetričke metode mjerenja, koje se zasnivaju na direktnom mjerenju predane snage ili ukupnih gubitaka. U tu svrhu treba nam i sprava i vremena daleko više no obično.

Uobičajeni tok proračunavanja korisnosti polazi od slijedećeg razmatranja: Motor priključen na mrežu uzima kod opterećenja iz mreže snagu N_1. Od toga se jedan dio gubi na gubitke u željezu $N_ž$ i gubitke u namotu statora N_{Cu1}. Velik dio dodatnih gubitaka N_{dod} također nastaje u statoru, pa treba i ove odbiti. Preostala snaga prelazi kao t. zv. snaga u zračnom ra-

sporu N_{zr} iz statora u rotor. Ovdje se dalje smanjuje za gubitke u bakru rotora N_{u}, dodatne gubitke u rotoru i gubitke u željezu rotora. Preostali dio snage pretvara se u mehaničku snagu, od koje još otpadaju gubici trenja motora N_{t_r}. Određeni dio gubitaka u željezu pokriva također rotor mehanički. Preostala mehanička snaga N_2 ostaje raspoloživa na spojki kao korisna predana snaga motora. Omjer ove predane snage prema snazi iz mreže predstavlja korisnost motora.

Ukupni gubici u željezu $N_{ž}$ koje možemo izmjeriti, sastoje se od pravih gubitaka histereze i vrtložnih struja u statorskim i rotorskim limovima, od kojih se prvi premagnetiziraju frekvencijom mreže, a drugi samo vrlo malom frekvencijom klizanja. Ovi gubici u željezu rotora razmjerno su mali. K tome dolaze gubici zbog vrtložnih struja na obrađenim mjestima površine obaju paketa limova, jer ovdje nastaje, zbog stvaranja srha, vodljivi sloj, smješten poprijeko prema magnetskim silnicama. U njemu je djelomično poništeno djelovanje lameliranja i izolacije limova. Daljnji gubici u željezu nastaju zbog pulzacije magnetskog polja u rasporu, koja potječe odatle, što se izmjenjuje zub i otvor utora. Odgovarajući gubici nastaju u zubima rotora i statora. Dodatni gubici, koje pribrajamo pravim gubicima u željezu, nastaju u tlačnim pločama paketa i u gornjim slojevima vodiča rotora bližim rasporu. Kod motora s kaveznim rotorom nastupaju još gubici i zbog prigušivanja nadvalova polja, koji nastaju zato, što rotorski namot rotira sinhrono samo za osnovni val polja, dok ga nadvalovi sijeku gotovo punom brzinom. Ovi gubici rastu kod opterećenja, no odgovarajući dio spada onda u dodatne gubitke kod opterećenja, koje ne možemo mjeriti. Sve ove gubitke pokriva dijelom direktno mreža, a dijelom treba mehaničkim putem od osovine svladati kočni moment, koji oni proizvode. Tu mehaničku snagu pokriva međutim kod podsinhronog rada također mreža, tako da snaga, koju motor uzima u praznom hodu iz mreže, sadrži ukupne gubitke praznog hoda u željezu. Dobivamo ih tako, da odbijemo gubitke trenja i gubitke praznog hoda u bakru. Između praznog hoda i opterećenja mijenja se ponešto magnetski tok asinhronog motora uz konstantni napon na stezaljkama zbog pada napona u djelatnom i induktivnom otporu statora. Zbog toga se neznatno smanje gubici u željezu statora, dok se nasuprot tome gubici u željezu rotora neznatno povećaju, jer frekvencija klizanja kod opterećenja raste. Uobičajeno je, a i ispravno, da kod normalnih strojeva uvršćujemo i kod opterećenja nepromijenjene gubitke praznog hoda u željezu, da ih dakle smatramo nezavisnima o opterećenju.

Gubici u statorskom namotu N_{Cu_1} nastaju kao normalni djelatni gubici izazvani otporom namota. Računamo ih:

$$N_{Cu_1} = m_1 \cdot I_{1f}^2 \cdot R_{1f},$$

ili jednostavnije kod trofaznih motora:

$$= 1{,}5 \cdot R_{st} \cdot I_1^2 ,$$

gdje je:

m_1 = broj faza statora,
I_{1f} = fazna struja statora,
R_{1f} = topli otpor statora po fazi,
I_1 = mrežna struja, bez obzira na spoj statora,
R_{st} = topli otpor između stezaljki za priključak na mrežu, bez obzira na spoj statora.

Kao otpor statorskog namota treba uvrstiti ili izmjerenu toplu vrijednost, ili pak vrijednost preračunanu na 75°.

Dodatne gubitke N_{dod} kod opterećenja u namotu statora i rotora, u aktivnom željezu i metalnim konstrukcionim dijelovima u blizini namota, koji su uglavnom prouzrokovani vrtložnim strujama, niti mjerimo, niti unaprijed proračunavamo. Uzimamo ih u obzir s pretpostavkom, da se snaga motora, koji radi pri nominalnom opterećenju, smanjuje za 0,5% primljene snage. Kod djelomičnog opterećenja preračunavamo ih kvadratično sa mrežnom strujom. U stvari se čini, osobito kod manjih motora, da oni prilično prekoračuju ovaj iznos propisima (REM) određen.

Gubici u namotu rotora N_{Cu} nastaju isto kao i u namotu statora kao trujna toplina, te ih možemo kod kolutnih rotora računati na isti način:

$$N_{Cu2} = m_2 \cdot I_{2f}^2 \cdot R_{2f} ,$$

ili jednostavnije kod trofaznog rotora:

$$= 1{,}5 \cdot R_k \cdot I_{kl}^2$$

gdje je

m_2 = broj faza rotora,
I_{2f} = fazna struja rotora,
R_{2f} = topli otpor rotora po fazi,
I_{kl} = struja na kliznim kolutima, bez obzira na spoj,
R_{kl} = topli otpor među kliznim kolutima, bez obzira na spoj rotora.

No ovaj je način proračunavanja uobičajen samo kod prethodnog proračuna motora. Čim poznajemo rezultate mjerenja na gotovom stroju, možemo odrediti gubitke u bakru rotora sigurnije i jednostavnije s pomoću klizanja. Do toga dolazimo slijedećim razmatranjem. Zamislimo stator motora nadomješten pločom spojke, koja se okreće sinhronom brzinom motora, te okreće sobom i rotor, na koji prenosi puni zakretni moment, koji odgovara snazi u rasporu N_{zr}. Brzina rotora odstupa za brzinu vrtnje klizanja od sinhrone brzine, procentualno dakle za klizanje u postocima od 100% sinhrone brzine vrtnje. Zbog toga uzima rotor, kao kod svake meha-

ničke spojke, koja kliže, samo odgovarajuću smanjenu snagu. Ostatak je izgubljen. Kod mehaničke spojke pretvara se u toplinu, kod asinhronog motora u električku snagu rotorskog kruga, dakle u zadnjoj liniji opet u toplinu u namotu rotora, kod prijelaza na četkicama, u vanjskim dovodima i u eventualnim regulacionim otpornicima. Proračunavamo prema relaciji:

$$N_{Cu2} = N_{zr} \cdot s\,\%/100,$$

ili

$$= N_m \frac{s\,\%}{100 - s\,\%},$$

gdje je N_{zr} snaga u rasporu, N_m = snaga, koju motor predaje.

Snagu u rasporu možemo vrlo približno uzeti:

$$N_{zr} = N_1 - N_{Cu1} - N_{\check{z}} - N_{dod},$$

gdje su $N_{\check{z}}$ = ukupni gubici u željezu, N_{dod} = ukupni dodatni gubici.

Gubici trenja N_{tr} pojavljuju se kao trenje u ležajima, trenje zraka i trenje četkica. Mijenjaju se s brzinom vrtnje motora i ponešto s temperaturom ležaja i zraka. Budući da su te promjene s obzirom na gotovo konstantnu brzinu motora od praznog hoda do opterećenja tek vrlo male, uzimamo, da su gubici trenja isto kao i gubici u željezu nezavisni o opterećenju. Trebalo bi ih zapravo odbiti tek od mehaničke snage rotora, pa bismo ih u tu svrhu morali odvojiti od gubitaka u željezu, koje smo zajedno izmjerili, no kod određivanja korisnosti nije nikakva pogreška, ako ih odbijemo odmah od snage statora. Time uštedimo razdvajanje užih gubitaka praznog hoda metodom, koja je navedena kod pokusa praznog hoda, a koja uvijek zahtijeva čitav niz mjerenja u praznom hodu te izradu dijagrama. Kod većih motora zanima nas, istina, da točno znamo, kako gubitke trenja, tako i gubitke u željezu. Tada ih možemo zasebno uvrstiti i kod izračunavanja η.

Kod strojeva opremljenih stranom osovinom i ležajima (motori za stapne kompresore) ne uvršćujemo onaj dio trenja, koji otpada na ležaje. Kako je podjela na gubitke u zraku i u ležajima vrlo teška, računamo u takvim slučajevima korisnost bez trenja. Potrebno je onda odgovarajuće upozorenje.

Na sl. 44 bio je već prikazan tok snage, uzimajući točno u obzir sve pojedinačne gubitke.

Idući primjer pokazuje, kako teče proračun korisnosti. Polazimo od faktično mjerenih točaka opterećenja ili uzimamo mrežnu struju, faktor snage kao i klizanje s karakteristika opterećenja ili s kružnog dijagrama. Ako polazimo od kružnog dijagrama, bit će bolje da gubitke u rotorskom namotu računamo iz otpora i struje, jer male vrijednosti klizanja ne možemo baš jako točno očitati. Na kraju računa dobivamo predanu snagu za

različite stupnje opterećenja. Nanesemo li η u zavisnosti o predanoj snazi, to možemo odmah odrediti sve međuvrijednosti za određena djelomična opterećenja, dakle napose za $^1/_4$, $^1/_2$, $^3/_4$, $^1/_1$ i $^5/_4$ opterećenja.

Napon mreže U	V	380	380	380	380
Primljena snaga N_1	kW	80,00	60,00	40,00	20,00
Faktor snage $\cos\varphi$	—	0,86	0.85	0,71	0,63
Mrežna struja I_1	A	141,5	107,5	75.2	48,3
Klizanje s %	%	3,6	2,7	1.8	0,9
Uži gubici praznog hoda $N_ž + N_{tr}$	kW	2,80	2,80	2 80	2,80
Gubici u bakru statora N_{Cu1}	kW	3,40	1.97	0,96	0.40
Dodatni gubici N_{dod}	kW	0,40	0,23	0,11	0.05
Snaga u rasporu N_{zr}	kW	73,40	55.00	36,13	16 75
Gubici u bakru rotora N_{Cu2}	kW	2.64	1,48	0 65	0.15
Predana snaga N_2	kW	70.76	53,52	35,48	16,60
Ukupni gubici $N_{g\,uk}$	kW	9,24	6,48	4 52	3,40
Ukupni gubici u postocima primljene snage $N_{g\,uk}$%	%	11.55	10,80	11,30	17,00
Korisnost η %	%	88,45	89,20	88,70	83,00

Kod velikih strojeva s visokom korisnošću računamo η vrlo točno na ovaj način:

$$\eta\,\% = 100 - 100 \cdot \frac{N_1 - N_2}{N} = 100 - 100 \cdot \frac{N_{g\,uk}}{N_1}$$

Kod motora s regulacijom brzine vrtnje otpornicima, dobivamo jako sniženu korisnost:

$$\eta = \eta_M \cdot \frac{n}{n_M}.$$

gdje je η_M i n_M korisnost i brzina vrtnje normalnog, nereguliranog stroja uz isti zakretni moment, dok je n regulirana brzina vrtnje.

Garancije i tolerancije. Kod asinhronih strojeva često se daju garancije za korisnost. faktor snage i preopteretivost, a kod kaveznih motora još i za zaletnu struju, potezni moment i minimalni zaletni moment. U posebnim slučajevima, na pr. kod motora, koji idu čvrsto paralelno vezani ili onih za pogon kompresora, navodimo i vrijednost klizanja kod punog opterećenja. Sve ove vrijednosti smatramo, da su održane, ako odstupanja ne prelaze slijedeće vrijednosti prema propisima (REM).

Garancija za:	Dopušteno odstupanje:
Korisnost η %	$\pm\frac{100-\eta\%}{10}$ zaokruženo na 0,1%, no najmanje 0,5%.
Faktor snage $\cos\varphi$	$\pm\frac{1-\cos\varphi}{6}$, zaokruženo na 0,01, no najmanje 0,02, a najviše 0,06.

Brzinu vrtnje	$\pm$	20% propisane vrijednosti klizanja.
Prekretni moment	$\pm$	10% propisane vrijednosti
Potezni moment	$\pm$	10% propisane vrijednosti
Zaletnu struju	+	20% propisane vrijednosti

Kao normalnu vrijednost treba prema propisima (REM) uzeti za minimalni zaletni moment, t. j. najmanji moment, koji motor daje za vrijeme zaleta, 0,3-struku, a kao normalnu vrijednost za prekretni moment 1,6-struku vrijednost nominalnog momenta motora.

Obilježavanje. Natpisna pločica ispitanog stroja sadrži podatke: proizvođač, tip motora, broj fabrikacije, način upotrebe, nominalna snaga, nominalni napon, nominalna struja, nominalna frekvencija, faktor snage i spoj statora, a osim toga i vrst pogona, nominalna brzina vrtnje, napon, struja i spoj rotora.

Napon rotora je napon među kolutima, mjeren kod mirovanja. Kod trofaznih rotora navodimo samo jedan napon, kod dvofaznih napon faze i $\sqrt{2}$-struku vrijednost.

Rotorsku struju obično računamo:

$$I_2 \approx \frac{N \cdot 1000}{\sqrt{3}\; U_{20}\; 0.95}$$ kod trofaznih rotora, i

$$I_{2f} \approx \frac{N \cdot 1000}{2 \cdot U_{20f} \cdot 0,95}$$ kod dvofaznih rotora kao faznu struju, i

$$I_{2lin} = I_{2f} \cdot \sqrt{2} = \frac{N \cdot 1000}{U_{20lin} \cdot 0,95}$$ kao linijsku struju.

Vrijednost 0,95 uzima u obzir gubitke u samom rotoru.

Kružni dijagram trofaznog asinhronog stroja s kliznim kolutima. Struja I_1, koju uzima iz mreže asinhroni motor, odnosno koju šalje u mrežu asinhroni generator, leži na kružnici, koju je naveo u osnovnom pojednostavljenom obliku Heyland, a u proširenom obliku Ossanna. S ove kružnice možemo osim toga dobiti faktor snage mreže cos φ, struju rotora I_2, snagu N_1, koju stroj uzima ili predaje mreži, korisni zakretni moment M, koji dobivamo na osovini, i predanu ili dovedenu mehaničku snagu na spojki N_2. Napose možemo s kružnog dijagrama očitati maksimalne vrijednosti zakretnog momenta i korisne snage, koje tek rijetko možemo odrediti neposrednim pokusom. Dijagram upotpunjujemo ucrtavanjem linija za klizanje. Očitavanje korisnosti također je moguće, ali ga u praksi u ispitnim stanicama jako potiskuje izračunavanje točku po točku, što je točnije.

Preporučuje se, da se prikažu linijske struje, koje teku u dovodima od mreže do statora i u vanjskim dovodima do kliznih koluta, jer ih onda možemo i kod namota spojenih u trokut usporediti s vrijednostima, koje

smo dobili kod ispitivanja stroja, bez preračunavanja s $\sqrt{3}$. Jedino je kod proračunavanja unaprijed uobičajeno, da polazimo od faznih struja. Umjesto faznih otpora statora i rotora R_{1_f} i R_{2_f} računamo radije s vrijednostima R_{st} i R_{kl}, koje dobivamo također iz neposrednih rezultata mjerenja. Ove predočuju, kako im i indeksi naznačuju, vrijednosti otpora između stezaljki statora, odnosno kliznih koluta rotora u pogonskom spoju. Općenito je dakle $R_{st} = 2 \cdot R_{1_f}$ u spoju $\curlywedge$, odnosno $= \frac{2}{3} \cdot R_{1_f}$ u spoju Δ, te $R_{kl} = 2 \cdot R_{2_f}$ u spoju $\curlywedge$, odnosno $= \frac{2}{3} \cdot R_{2_f}$ u spoju Δ. Prednosti se pokazuju osobito kod izračunavanja gubitaka, koji iznose:

$$N_{Cu1} = 1{,}5 \cdot R_{st} \cdot I_1^2 \text{ u statoru, te } N_{Cu2} = 1{,}5 \cdot R_{kl} \cdot I_2^2 \text{ u rotoru.}$$

Kod crtanja i razrade dijagrama potrebna su nam četiri mjerila, no samo jedno od njih odabiramo slobodno, i to za mrežnu struju I_1. Odabiramo ga tako, da točka kratkog spoja padne još u raspoloživi prostor. Kod trofaznog statora i trofaznog rotora odabiramo mjerila:

mjerilo za mrežnu struju I_1 u A 1 mm $= a_1$ A (odabiramo slobodno),

mjerilo za rotorsku struju I_2 u A 1 mm $= a_2$ A $\left(a_2 = a_1 \cdot \frac{U_1}{U_{20}}\right)$,

mjerilo za snagu u W 1 mm $= w$ W $(w = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot a_1)$,

mjerilo za zakretni moment u mkg 1 mm $= m$ mkg $(m =$

$$= \frac{0{,}973}{n_{sin}} \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot a_1).$$

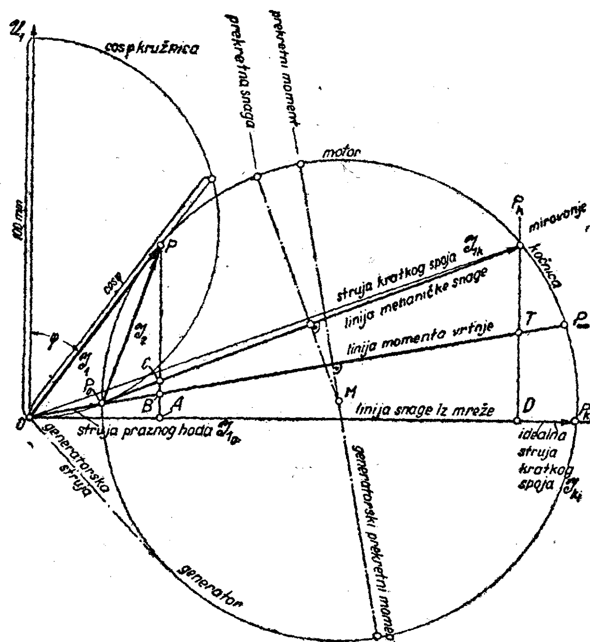
Crtanje kružnog dijagrama. Konstrukcija kružnog dijagrama reproducirana je na sl. 53. Uzimajući u obzir faktore snage i odabrano mjerilo za primarnu struju, povučemo od 0 struju praznog hoda I_{10} i struju kratkog spoja $I_{1'}$. Tako dobijemo obje točke P_0 i P_k. U točki P_0 povučemo vertikalu, koja siječe vektor struje kratkog spoja u točki a. Tražena kružnica prolazi kroz tri točke: P_0, a i P_k (sl. 54a). Središte M mora dakle ležati na simetrali dužine P_0P_k, i na simetrali dužine $P_0\,a$, koja leži paralelno s nul-linijom. Ova konstrukcija vrijedi, kad su gubici u bakru jednako razdijeljeni na stator i rotor. Ako njihov omjer međutim nije 1 : 1, postupamo na slijedeći način. Odredimo točku P'_0, koja leži vertikalno ispod točke P_0, spuštena za iznos gubitaka trenja. Kroz ovu točku položimo pravac s nagibom prema horizontali $(2 \cdot I_{10_f} \cdot R_{1_f}) : (U_{1_f}) = \sqrt{3} \cdot I_{10} \cdot R_{st} : U_{mrež.}$. Ovaj siječe simetralu dužine P_0P_k u točki M (sl. 54b).

Radnu točku za neizmjerno veliko klizanje P_{∞} nađemo tako, da na vertikalu kroz P_k nanesemo od nul-linije dužinu $n_{Cu1} = \frac{I_{1k}^2 \cdot 1.5 \cdot R}{w}$ mm. Dobivamo točku T, koju spojimo sa P_0. Spojnicu produžimo do kružnice, pa dobivamo traženu točku P_{∞}. Preostala dužina $P_k T$ mora odgovarati gubicima rotorskog namota u kratkom spoju, t. j. mora biti jednaka $n_{Cu2} = \frac{I_{2k}^2 \cdot 1.5 \cdot R_{kl}}{w}$ mm. I_{1k} je struja kratkog spoja u statoru, I_{2k} struja kratkog spoja u rotoru, koja je jednaka (dužina $P_0 P_k$) $\cdot a$. Osim toga mora ta ista dužina $P_k T = n_{Cu2}$ u mm odgovarati zakretnom momentu, koji razvija motor bez pokretača pri mirovanju. Mora dakle biti $P_k T = M_t / m$ mm. Ako ne znamo otpore statora i rotora, raspolovimo vertikalu kroz P_k i spojimo sredinu sa P_0. Ovo pojednostavljenje, koje vrlo često upotrebljavamo, vrijedi točno, ako se gubici u statoru i rotoru odnose kao 1 : 1. Kod motora s razmjerno velikim gubicima u rotoru penje se onda, naravno, P_{∞} odviše visoko na kružnici. Nanošenje obiju izračunatih dužina gubitaka n_{Cu1} i n_{Cu2} dobra je kontrola mjerenja snage u kratkom spoju.

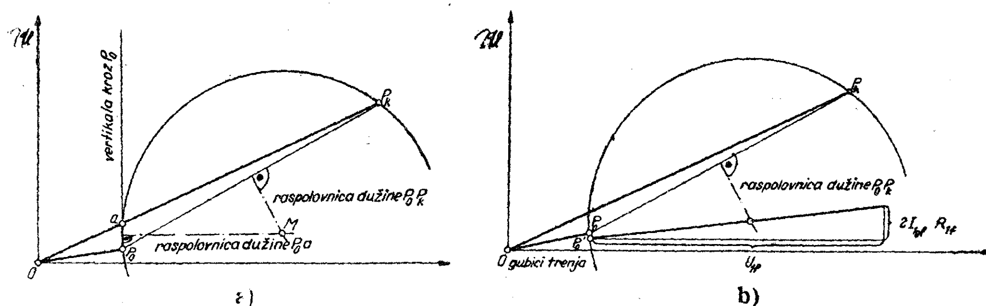
Linije zakretnog momenta i snage dobivamo, kad spojimo točku praznog hoda P_0 sa P_{∞}, odnosno sa P_k. Dobivamo snagu primljenu iz mreže N_1 kao $(PA) \cdot w$, zakretni moment M kao $(PB) \cdot m$, i predanu mehaničku snagu N_2 kao $(PC) \cdot w$. Kod toga su potpuno uzeti u obzir gubici trenja i gubici u željezu. A, B i C su sjecišta vertikale iz bilo koje točke P kružnice s nul-linijom, linijom momenta i linijom mehaničke snage. Posve točno bismo dobili N_2 i M, kad bismo upotrebljavali okomicu na polumjer $P_0 M$ kružnice, no uzeto pojednostavnjenje možemo gotovo uvijek dopustiti. Razabiramo, da zakretni moment u točki P_k još ima određenu vrijednost, dok je korisna mehanička snaga naprotiv iščezla. U točki P_0 nestaje i moment i mehanička snaga. Na luku između P_0 i P_k leži pravo područje rada motora. Rad je stabilan samo između P_0 i točke prekretnog momenta, koju lako nađemo, ako povučemo iz središta kružnice M okomicu na liniju momenta, te je produžimo do same kružnice. Snaga, koju motor predaje na osovini, dosiže maksimum već nešto prije. Pripadnu točku kružnice možemo naći kao sjecište okomice iz M na liniju mehaničke snage.

Želimo li naći točke kružnice, koje odgovaraju određenim snagama motora, na pr. $P_{1/4}$, $P_{1/2}$, $P_{3/4}$ i $P_{1/1}$ za 1/4, 1/2, 3/4 i 1/1 opterećenja, povučemo kroz središte kružnice (gdje to najmanje kvari preglednost) vertikalu. Na ovu nanosimo, polazeći od sjecišta s linijom mehaničke snage, prema gore odgovarajuće dužine u milimetrima $N_n/4w$, $N_n/2w$, $3N_n/4w$ i N_n/w. Kroz pripadne točke vučemo sada na lijevo paralele s linijom mehaničke snage, koje sijeku kružnicu u traženim radnim točkama. Za ove točke možemo

sada očitati statorsku struju I_1, faktor snage $\cos\varphi$, snagu iz mreže N_1 i rotorsku struju I_2. N_1 kontrolirat ćemo najbolje, ako želimo izračunavati korisnost, tako da iz U_1, I_1 i $\cos\varphi$ računski odredimo istu vrijednost: $N_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1$ W. Rotorsku struju I_2 dobivamo kao $(P_0P) \cdot a_2$ u A. Pomnožimo li pak dužinu (P_0P) mjerilom za primarnu struju a_1, dobivamo rotorsku struju I'_2, t. j. struju reduciranu na efektivni broj zavoja statora



Sl. 53. Kružni dijagram asinhronog motora



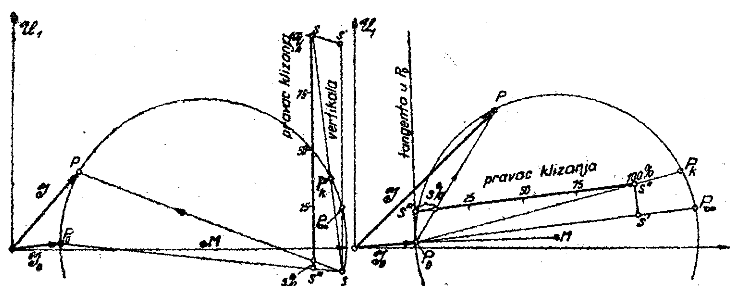
Sl. 54. Određivanje središta kružnog dijagrama uz pretpostavku jednakih gubitaka u bakru statora i rotora (a), i uzimajući u obzir pravi otpor statora (b).

Dužina struje statora (OP) pomnožena mjerilom za snagu w daje prividnu snagu statora.

Određivanje klizanja. Klizanje očitavamo s kružnog dijagrama s pomoću pravca klizanja ili ga pak određujemo točku po točku malim pomoć-

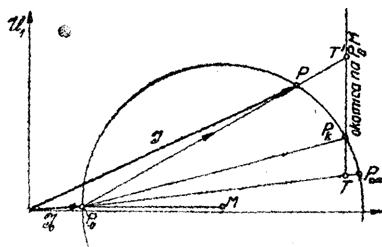
nim računom. Teoretski možemo konstruirati beskonačno mnogo pravaca klizanja, no najbolje je odabrati za određivanje srednjih klizanja paralelu s linijom momenta, a za određivanje malih klizanja u blizini radne brzine vrtnje okomicu na nul-liniju. Određivanje točku po točku ima osobitih prednosti, kad tražimo točke kružnice za klizanja iznad 0,5 do 2,0, koje trebamo kod pretvarača frekvencije ili kod strojeva spojenih u električku osovinu.

P r a v a c   k l i z a n j a   z a   m a l e   v r i j e d n o s t i. Prema sl. 55a povučemo kroz točku P_∞ vertikalu, koja siječe kružnicu u donjem sjecištu S. Od S prema gore nanesemo dužinu od 100 mm. To daje točku S'. S spojimo s P_0 i P_k. Paralela kroz S' s linijom SP_0 siječe liniju SP_k u točki S''. Vertikala kroz tu točku daje traženu liniju klizanja. S'' je točka za klizanje



a) vertikala $SS' = 100$ mm, dužina $S S'' \parallel SP_0$, PS odsijeca klizanje s %

b) dužina $P_0 S' = 100$ mm, dužina $S'S'' \parallel$ s tangentom u P_0, $P_0 P$ odsijeca klizanje s %.



c) pravac $TP_k \perp P_0 M$ (praktički $\perp$ na nul-liniju),

klizanje $s\ \% = \frac{TP_k}{TT'} \cdot 100$

T leži iznad P_k za $s < 1$,

T leži ispod P_k za $s > 1$

Sl. 55. Određivanje klizanja (a) za mala, (b) za srednja, (c) za veća klizanja

$s = 100\%$, a S''', koju dobivamo kao donje sjecište s pomoćnom linijom SP_0, te leži točno 100 mm ispod S'', vrijedi za klizanje $s = 0\%$. Podjela pravca klizanja je linearna, 1 mm jednak je 1% klizanja. Klizanje za bilo koju točku P kružnice naći ćemo tako, da spojimo P sa S. Ova linija siječe pravac klizanja u točki pripadnog klizanja. Vidimo, da je ova konstrukcija osobito prikladna za normalne radne točke.

Pravac klizanja za srednje vrijednosti. Prema sl. 55b povučemo u točki P_0 tangentu na kružnicu, te spojimo točku P_0 s točkama kružnice P_k i P_∞ (obje ove linije obično su već tu, kao linija mehaničke snage i linija momenta, te ih treba eventualno samo nešto produžiti). Na posljednjoj liniji, t. j. M-liniji, nanesemo dužinu 100 mm od P_0. Tako dobijemo točku S'. Paralela kroz S' s tangentom u točki praznog hoda P_0 siječe liniju P_0P_k, dakle liniju mehaničke snage, u S''. Traženu liniju klizanja dobivamo kao paralelu kroz tu točku S'' s linijom momenta P_0P_∞. S'' odgovara klizanju $s = 100\%$, a S''', t. j. sjecište s tangentom u točki P_0, klizanju $s = 0\%$. Podjela je opet linearna, 1 mm jednak je 1% klizanja. Za bilo koju točku kružnice P dobivamo klizanje kao sjecište pomoćne linije P_0P s pravcem klizanja.

Vidimo, da vrijednosti u neposrednoj blizini točke praznog hoda možemo bolje odrediti prvom konstrukcijom, a vrijednosti u blizini prekretne točke i točke mirovanja posljednjom konstrukcijom.

Ako napišemo na pravac klizanja umjesto 0% klizanja 100% brzine vrtnje, a umjesto 100% klizanja 0% brzine vrtnje, dobivamo liniju brzine vrtnje.

Određivanje klizanja točku po točku, odnosno određivanje točke kružnice za zadano klizanje. Povucimo kroz točku mirovanja vertikalu (točnije bi to morala biti paralela s tangentom u točki praznog hoda P_0), te označimo njezino sjecište s linijom momenta P_0P_∞ kao i prije sa T. Klizanje s % za bilo koju točku kružnice P, koju smo na pr. na sl. 55c odabrali između P_k i P_0 za slučaj pretvarača frekvencije, koji je smanjuje, dobivamo iz relacije:

$$s\,\% = \frac{\text{dužina } TP_k}{\text{dužina } TT'} \cdot 100.$$

T' je sjecište pravca P_0P s vertikalom kroz P_k. Obratno, radnu točku P, koja pripada određenom klizanju s %, dobivamo, ako uzmemo dužinu TT':

$$\text{dužina } TT' = \frac{\text{dužina } TP_k}{s\,\%} \cdot 100.$$

Za vrijednosti klizanja manje od 20%, ova je konstrukcija manje prikladna, jer dobivamo prevelike dužine TT'. Za veće vrijednosti, osobito za sve vrijednosti preko 100%, ona je najzgodnija, jer dobivamo najsigurnija sjecišta.

Određivanje otpora za pokretanje, kad motor stoji, i otpora za regulaciju kad motor ide. Iz relacije, koja vrijedi općenito:

$$\frac{R_{rotora} + R_{vanjski}}{s\; R_{rotora}} = \frac{\text{dužina } TT'}{\text{dužina } TP_k} \text{ (sl. 55 c)}, \quad s = \text{klizanje} = \frac{s\,\%}{100}$$

možemo izvesti ove jednadžbe. R_{rotora} je vlastiti otpor rotora, a $R_{vanjski}$ otpor za pokretanje priključen izvana na klizne kolute, oba uzeta po fazi zvijezde.

a) Želimo postići određeni potezni moment M_i. Potražimo točku P kružnice, kojoj odgovara taj zakretni moment, a koja mora ležati na stabilnom luku između točke praznog hoda P_0 i prekretne točke. Spojnica P_0P siječe vertikalu kroz P_k u T'. Dužina $T'P_k$ mjera je za otpor pokretača $R_{vanjski}$ koji treba priključiti, a dužina TP_k mjera za vlastiti otpor rotora R_{rotora}. Vrijedi:

$$R_{vanjski} = R_{rotora} \cdot \frac{\text{dužina } T'P_k}{\text{dužina } TP_k}.$$

b) Otpori za regulaciju, kad motor ide. Treba li brzinu vrtnje asinhronog motora smanjiti regulacionim otporima, postupamo na slijedeći način. Za traženi moment M odredimo točku P kružnice na stabilnom luku između P_0 i prekretne točke. Spojnica P_0P siječe vertikalu kroz P_k u T'. Otpor, koji treba priključiti, da bismo postigli klizanje $s = \frac{s\,\%}{100}$ dobivamo:

$$R_{vanjski} = R_{rotora} \cdot \left(s \cdot \frac{\text{dužina } TT'}{\text{dužina } TP_k} - 1\right).$$

Ova je vrijednost nula, kad treba postići klizanje, koje već odgovara normalnom klizanju stroja. Negativne vrijednosti znače, da treba regulirati na brzinu vrtnje, koja leži iznad normalne brzine motora. To je nemoguće.

c) Kolika će biti brzina vrtnje kod opterećenja, ako upotrebljavamo otpornik za regulaciju? Klizanje, koje odgovara zakretnom momentu u točki P kružnice, izračunavamo:

$$s = \frac{s\,\%}{100} = \left(1 + \frac{R_{vanjski}}{R_{rotora}}\right) \cdot \frac{\text{dužina } TP_k}{\text{dužina } TT'}.$$

Opće relacije. Rasipni faktori: u praksi upotrebljavamo različite faktore za ukupni rasip motora, od kojih se najviše služimo Heylandovim i Ossanninim rasipnim faktorom. Možemo ih izračunavati:

$$\tau_{Heyland} = \frac{I_0}{I_{k_i} - I_0}, \qquad \tau_{Ossanna} = \frac{I_0}{I_{k_i}}, \qquad I_{k_i} \approx \frac{I_k}{\sin \varphi_k}.$$

$$(1 + \tau_{Heyland}) = \frac{1}{(1 - \tau_{Ossanna})}.$$

Nadalje je:

$$\tau_{Heyland} = \frac{X_1 X_2}{M^2} - 1, \quad \text{te} \quad \tau_{Ossanna} = 1 - \frac{M^2}{X_1 X_2}.$$

X_1 = ukupni induktivni otpor po fazi statora,
X_2 = ukupni induktivni otpor po fazi rotora,
M = otpor međuinduktiviteta.

Prekretni moment. Maksimalni zakretni moment, koji može da razvije asinhroni motor, možemo vrlo približno odrediti, ako smo izveli

pokus praznog hoda i pokus kratkog spoja, kao:

$$M_{max} \text{ u mkg} = \frac{0{,}973}{n_{sin}} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot (I_{ki} - I_0)}{2 + \cos\varphi_k} \quad \text{uz} \quad I_{ki} \approx \frac{I_k}{\sin\varphi_k}.$$

M a k s i m a l n a s n a g a m o t o r a. Maksimalnu predanu snagu na osovini u kilovatima možemo također odrediti na temelju pokusa praznog hoda i kratkog spoja:

$$N_{2max} \text{ u kW} = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot (I_{ki} - I_0)}{1000 \cdot (2 + 2\cos\varphi_k)}$$

N a j b o l j i f a k t o r s n a g e. Maksimalnu vrijednost postizava $\cos\varphi$ onda, kada statorska struja u kružnom dijagramu tangira kružnicu. Ta vrijednost iznosi:

$$\cos\varphi_{max} = \frac{I_k - I_0}{I_{ki} + I_0} = \frac{1}{1 + 2\tau_{Heyland}} = \frac{1 - \tau_{Ossanna}}{1 + \tau_{Ossanna}}$$

Kod svih tih jednadžbi razabiramo usku povezanost s omjerom struje praznog hoda i struje kratkog spoja, dakle s ukupnim rasipnim faktorima stroja.

b) Polno preklopivi asinhroni strojevi

Asinhroni strojevi s više brzina vrtnje, što možemo postići preklapanjem broja polova namota nalaze sve šire područje primjene. U većini slučajeva preklapamo samo statorski namot, koji se sastoji ili od jednog jedinog namota, podijeljenog u grupe ili od više odvojenih namota. Rotor treba onda da ima kratkospojni kavez ili pak sam u sebi kratko spojeni višefazni namot, koji je djelotvoran kod svakog upotrebljenog broja polova. U slučaju da treba regulirati pokretanje ili brzinu vrtnje preko kliznih koluta, potrebno je i namot (ili namote) rotora izvesti do određenog broja koluta, preko kojih onda preklapamo broj polova uređajima, koji miruju ili rotiraju s rotorom. Da bismo smanjili potrebni broj kliznih koluta, uzimamo u ovom posljednjem slučaju često dvije faze, dok je broj faza statora uvijek jednak broju faza mreže. Namoti motora, ako su preklopivi za dva ili više broja polova, najbolje je da budu iz dvoslojnih oblikovanih svitaka prikladne širine posebno raspoređenih. Tako možemo postići znatno bolje krivulje polja u usporedbi s jednoslojnim namotima.

Ispitivanje ovih strojeva s preklopivim brojem polova, koje upotrebljavamo kao motore, proteže se u prvom redu na kontrolu ispravna spoja. Ovu provodimo jednostavno i većinom dovoljno sigurno mjerenjem otpora namota za različite spojeve. Na temelju sheme, koja je potrebna za ispitivanje, a koja na jasan način prikazuje spoj namota za pojedine brojeve polova, možemo ispitati, da li su otpori faza kod različitih spojeva onoliki, koliki bi trebali da budu. Ako se te vrijednosti slažu, onda kon-

troliramo ispravni smjer vrtnje. Kod toga treba znati, da su oznake stezaljki statora ispravne onda, kada uz faze mreže *RST*, priključene na stezaljke motora *UVW*, dobivamo uvijek isti smjer vrtnje. Različite brzine označit ćemo najbolje, ako u indeksima navedemo brojke, koje daju broj polova.

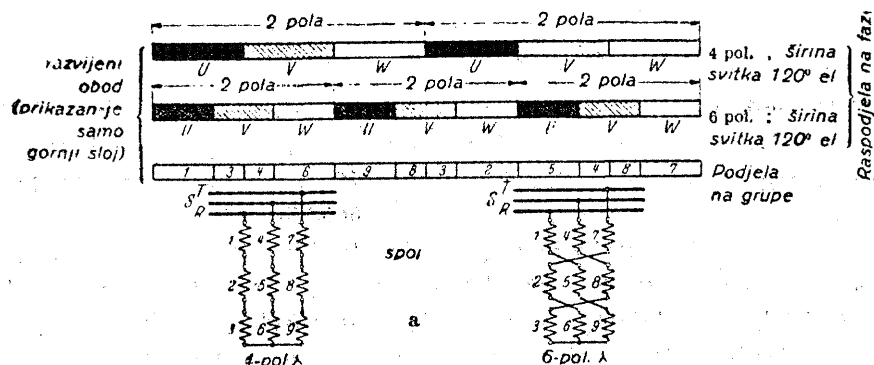
Vrlo je važno, da promotrimo eventualne struje izjednačenja u ostalim namotima, koji nisu upravo priključeni na mrežu. Ovakve struje mogu nastati u stanovitim slučajevima kod paralelno spojenih grupa ili kod spojeva u trokut i omjera broja polova 1 : 3, no općenito se kod faza, spojenih u seriju, naponi inducirani od polja drugog broja polova ukidaju. Ove struje izjednačenja, koje uzrokuju jedino nepotrebne gubitke i dodatno ugrijavanje, možemo ustanoviti, ako uključimo ampermetar u strujni krug namota, koji istražujemo. Ako kod ispitivanja ustanovimo struje izjednačenja unutar namota spojenog u trokut, moramo na polnoj preklopki predvidjeti dodatni uređaj za otvaranje trokuta, kad namot ne upotrebljavamo. Ako se pak radi o naponima paralelno spojenih grana, tada često pomaže jedino novo namatanje, kod kojega izbjegavamo paralelni spoj, koji je prouzročio pogrešku.

Ostalo ispitivanje izvodimo za svaki broj polova posebno, točno na isti način kao kod svakog normalnog asinhronog stroja. Pokus trajnog rada sa svrhom da odredimo ugrijavanje, možemo kod druge i ostalih brzina često nastaviti odmah iza prvog mjerenja, da bismo uštedjeli na vremenu.

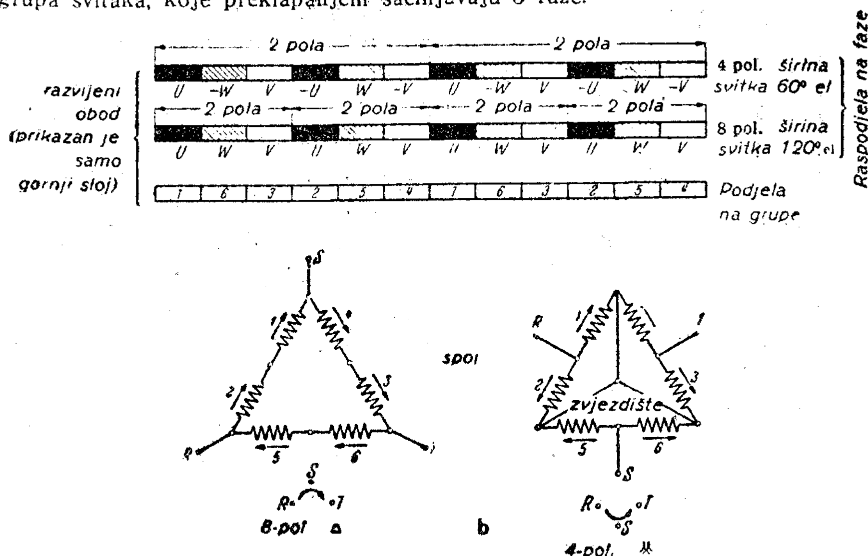
Dodatno ispitivanje je pokus preklapanja od jedne brzine na drugu. Svrha mu je mjerenje struja preklapanja i preklopnih momenata, a može se provesti, što je i razumljivo, jedino oscilografskim snimanjem.

Kako kod ispitivanja stroja ne raspolažemo uvijek pripadnom polnom preklopkom, a uobičajenim uređajima ispitne stanice ne možemo lako reproducirati njezino djelovanje, odričemo se obično izvođenja pokusa — pa i onda, kad su vrijednosti preklapanja garantirane — te određujemo veličinu struje i zakretnog momenta na dovoljno točan način iz »kružnog dijagrama«, koji računamo za pojedine brzine vrtnje i kontroliramo na temelju mjerenih vrijednosti. Točke preklapanja naći ćemo, ako razmislimo, koje klizanje će motor imati kod novog broja polova. Preklapamo li na pr. motor, koji ide sa 490 okr/min sa 12-polnog spoja na 8-polni namot sa sinhronom brzinom vrtnje 750 okr/min, ležat će radna točka neposredno nakon preklapanja kod klizanja od (750—490) : 750 = 34,6%. Ako otpori rotora nisu preveliki, odgovara točka preklapanja otprilike točki kratkog spoja kod novog broja polova, tako da možemo u prvom približenju kod takvih strojeva uzeti, da je struja preklapanja jednaka struji kratkog spoja. Zakretni moment zavisi međutim jako o samom klizanju, pa ga treba uvijek uzeti s »kružnog dijagrama«.

Kod zaustavljanja motora s preklopivim polovima, često upotrebljavamo nadsinhrono kočenje preklapanjem od veće brzine na prvu manju, pa se gdjekada pitamo, koliki su kod toga momenti i struje. Najbolje ćemo ih odrediti po podacima kružnog dijagrama, uzimajući u obzir vrijednost



a) Primjer polno preklopivog namota za bilo koja dva broja polova. Podjela na 9 grupa svitaka, koje preklapanjem sačinjavaju 3 faze.



b) Dahlander-ov spoj za preklapanje polova u omjeru 1 : 2. Namot je podijeljen u 6 grupa, iz kojih, većinom bez unutarnjeg prespajanja, premještanjem priključaka mreže i stvaranjem zvjezdišta, nastaju oba broja polova. Treba paziti na zamjenu dvaju priključaka mreže, jer se u protivnom slučaju mijenja smjer vrtnje.

Sl 56. Preklapanje polova uz bilo koji omjer broja polova (a), i uz omjer 1 : 2 (b).

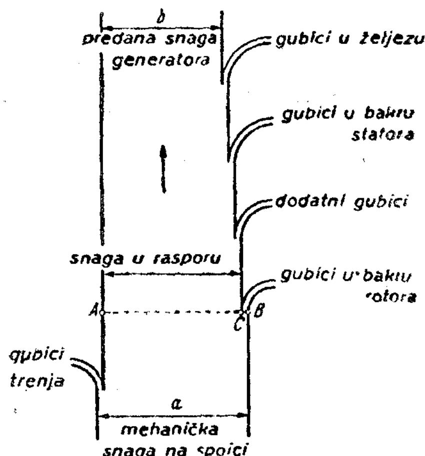
klizanja, koja je sada negativna. Šesteropolni stroj, koji ide na pr. sa 990 okr/min, imat će nakon preklapanja na 12 polova sa sinhronom brzinom 500 okr/min u prvom času klizanje od (500—990) : 500 = —98%.

Dva najviše upotrebljavana načina preklapanja polova, prikazana su na sl. 56, i to: 1. preklapanje podjelom pojedinih faza po grupama na tri

dijela i 2. preklapanje polova u omjeru 1 : 2 prema Dahlanderu. Spoj može obično za svaki broj polova biti u trokut ili zvijezdu, te se ravna prema snagi koju trebamo. No često odlučuje jednostavnija izvedba preklopke ili unutarnji spoj stroja da uzmemo određeni spoj faza, koji ne odgovara uvijek najbolje postojećim prilikama opterećenja.

c) Asinhroni generator

Način rada. Kod brzine, koja prekoračuje brzinu vrtnje praznog hoda, prelazi asinhroni stroj, kao i svaki električki stroj s porednom karakteristikom, u generatorski rad. Rotor se tada okreće brže od okretnog polja statora, koje rotira sinhrono, t. j. on ide nadsinhrono. Pogonskom momentu na spojci, koji većinom daje vodna turbina, rjeđe parni stroj ili sl., suprotstavlja se generatorski kočni moment stroja. Ovaj zavisi o veličini nadsinhronog klizanja i pokazuje, poput zakretnog momenta kod motorskog rada, maksimalnu vrijednost, koja je nešto veća od one. Struje i snage možemo također uzeti s kružnog dijagrama. Generatorski rad počinje nešto ispod točke P_0, te seže preko donjeg kružnog luka sve do točke P_∞. Ova točka vrijedi dakle za beskonačno veliku brzinu vrtnje u smjeru vrtnje okretnog polja kao i u suprotnom smjeru. Na sl. 53 bila je već prikazana kružnica, na kojoj je posebno označena generatorska radna točka. Razrada mjerenja i izračunavanje korisnosti teče jednako kao kod asinhronog motora. Pokus praznog hoda i kratkog spoja isti su kao i tamo. Jedino snimanje opterećenja izvodimo u generatorskom radu, i to tako, da stroj tjeramo strojem ispitne stanice.



Sl. 57. Tok djelatne snage asinhronog stroja kao generatora. Dužina AC odgovara sinhronoj brzini vrtnje, dužina AB faktičnoj brzini vrtnje, a dužina BC klizanju. Korisnost $\eta = b/a$

Klizanje je generatora prema definiciji negativno, pa ga treba i u formulama uvrstiti s negativnim predznakom. Gubici u bakru rotora, koje računamo množenjem klizanja i snage u rasporu, pozitivni su, jer je i snaga u rasporu sada postala negativna. Ona je sada veća od snage iz mreže, i to za iznos gubitaka, koji nastaju u statoru. Vidimo to na slici toka snage (sl. 57). Jedan te isti asinhroni stroj ima kao generator veću snagu nego kao motor. Snage se odnose kao 1 : korisnost motora. Stanovito smanjenje u usporedbi s time nastupa u slučaju, kad je faktor snage manji nego u motorskom radu.

Rad asinhronog generatora, koji je uostalom većinom opremljen kaveznim rotorom, moguć je samo uz mrežu, koja ga vodi. Ova daje jalovu struju potrebnu za magnetiziranje. Frekvencija generatora slaže se s frekvencijom mreže. Predana djelatna snaga zavisi samo o brzini vrtnje, a ova se udesi, ukoliko pogonski moment ne prekoračuje prekretni moment generatora, sasvim automatski prema raspoloživoj snagi za pogon, te leži 1 do 3% iznad sinhrone brzine vrtnje. Asinhroni generator vrlo je prikladan za male hidrocentrale bez posluge, osobito zato, što ne treba regulacionih naprava za frekvenciju i napon.

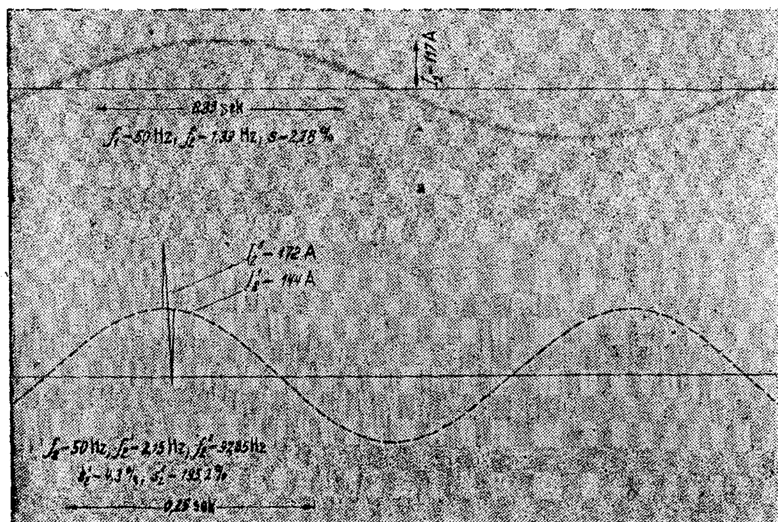
Asinhroni generator u spoju s kondenzatorima može se sam uzbuditi i držati napon, no to vrlo malo upotrebljavamo. U praznom hodu uzbudi se do onog napona, kod kojega uzima jalovu snagu točno jednaku jalovoj snazi, koju daje paralelno spojeni kondenzator.

d) Jednofazni asinhroni motor

Način rada. Normalni trofazni asinhroni motor ide dalje kao jednofazni motor, ako kod rada dođe do prekida jednoga od triju priključaka na mrežu. Sposobnost davanja snage s obzirom na zagrijavanje padne za cca 30 do 40%, a faktor snage smanji se za nekoliko stotinaka. Kako se prekretni moment znatno smanji, i to otprilike na polovicu, moramo snagu stroja gdjekada smanjiti čak za 40 do 50%. Stator jednofaznog motora često ima normalni trofazni namot. Jedna faza služi kao pomoćni namot za pokretanje, a obje ostale faze spojene u seriju zapravo su glavni ili radni namot. Glavni i pomoćni namot možemo, naravno, različito izvesti. Njihove osi međusobno su okomite.

Kad jednofazni motor miruje, priključen bez pomoćne faze na mrežu, ne razvija nikakav zakretni moment. Izmjenično polje, koje nastane, možemo rastaviti u dva okretna polja suprotnog smjera vrtnje. Oba djeluju na rotor jednakim momentom, ali u suprotnom smjeru. Čim rotor zbog vanjskog pogona, ili neopterećen zbog malih vlastitih njihaja krene u bilo kojem smjeru, okretno će polje istoga smjera porasti, a suprotnog smjera će se smanjiti, pa dobivamo pretičak momenta u smjeru vrtnje, koji ubrzava rotor. Ovaj se zaleti, pri čemu zakretni moment stalno raste. Moment dosegne maksimalnu vrijednost i spusti se prije samoga sinhronizma do nule. Praktički dosegne motor sinhronu brzinu vrtnje. Kod ove i u njenoj blizini protuhodno okretno polje gotovo je iščezlo, a istohodno doseglo je punu vrijednost, te je točno tako jako, kao kod trofaznog stroja, koji je priključen na linijski napon jednak jednofaznom naponu jednofaznog stroja. Polje jednofaznog motora kod mirovanja je dakle izmjenično, kod zaleta eliptičko okretno polje, a u praznom hodu uz radnu brzinu vrtnje gotovo kružno okretno polje.

U rotoru teku dvije posve različite struje, od kojih jedna ima frekvenciju klizanja, dok je frekvencija druge jednaka gotovo dvostrukoj frekvenciji mreže. Ona iznosi točno: (dvostruka frekvencija mreže — frekvencija klizanja). Obje struje su praktički jednako velike, struja veće frekvencije nešto je veća od druge. U praznom hodu nestaje struja frekvencije klizanja, dok druga drži magnetsku ravnotežu polovici struje statora. Zbog toga mora i struja praznog hoda, koju stroj uzima iz mreže, biti veća nego kod trofaznog rada, gdje u praznom hodu nema protumagnetizirajuće reakcije armature. Struja praznog hoda veća je okruglo za $\sqrt{3}$ puta od one kod trofaznih strojeva. Otvorimo li pak strujni krug rotora jednofaznog stroja, tako da otpadnu protu-AZ rotora, struja praznog hoda padne na polovicu. Stroj radi opet sa čistim izmjeničnim poljem,



Sl. 58. Oscilogrami sekundarne struje asinhronog motora priključenog trofazno (a) i priključenog jednofazno (b), uz isti moment opterećenja.

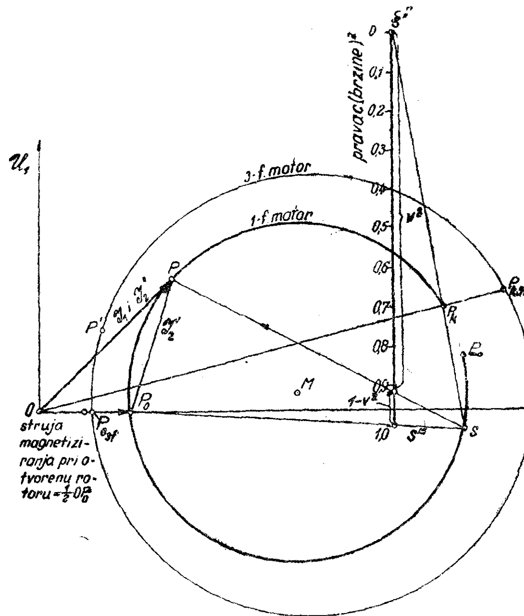
a na kliznim kolutima pojavljuje se visoki napon dvostruke frekvencije mreže. Gubitke u bakru rotora računamo kao umnožak broja faza, otpora i sume kvadrata obiju struja rotora. Oni su više nego dva puta veći od gubitaka trofaznog motora opterećenog jednakim zakretnim momentom. Vremensku krivulju rotorske struje vidimo na oscilogramu na sl. 58. Gubitke u rotoru izračunavamo najbolje: $N_{Cu2} \approx N_{zr} \cdot (1 - v^2)$, gdje je $v = (1 - s)$, a N_{zr} snaga u rasporu. Kod malih klizanja možemo mjesto $(1 - v^2)$ vrlo približno pisati 2s, dakle dvostruko klizanje, tako da dobivamo:

$$N_{Cu2} \approx N_{zr} \cdot 2s$$

Kao što ćemo vidjeti na dijagramu, možemo $(1 - v^2)$ kao »prividno klizanje« očitati sa kvadratične skale brzine na isti način kao pravo klizanje kod trofaznog motora. U sinhronizmu će približne formule zatajiti, jer tu računski dobivamo gubitke u rotoru nula, ma da struja dvostruke frekvencije mreže uzrokuje male gubitke.

Struja kratkog spoja jednofaznog motora manja je nego kod odgovarajućeg trofaznog motora, te iznosi $\sqrt{3}/2$, dakle okruglo 87% od ove. Kod motora s pomoćnom fazom razlikujemo dvije struje kratkog spoja, koje određujemo odvojenim pokusima kratkog spoja.

Dijagram jednofaznog motora bez pomoćnog namota. Kružni dijagram jednofaznog motora, koji je priključen samo jednim namotom na mrežu, možemo nacrtati na sličan način kao kod trofaznog motora (sl. 59).



Sl. 59. Kružni dijagram jednofaznog asinhronog motora. Za usporedbu unesena je i kružnica trofaznog motora. (Mjerilo snage manje je kod 1-faznog motora, nego kod 3-faznog. Točka P' odgovara istom momentu kao i točka P.)

Nanesemo struju praznog hoda i struju kratkog spoja uzevši u obzir $\cos \varphi_0$ i $\cos \varphi_k$. Središte M i točku P_∞ odredimo na isti način kao kod trofaznog motora, pri čemu pravimo samo malu pogrešku. Posebno treba upozoriti, da dio kružnog luka od P_k do P_∞ ne postoji, jer nema okretanja u smjeru suprotnom od okretnog polja, budući da se ovo uvijek okreće u smjeru mehaničke vrtnje rotora. Linija momenta ne postoji, a

liniju mehaničke snage možemo tek približno predočiti pravcem kroz točku praznog hoda P_0 i točku mirovanja P_k. Linija klizanja nadomještena je kod jednofaznog motora linijom kvadrata brzine. Ovu ucrtavamo na isti način kao liniju klizanja kod trofaznog motora, samo što odsječak s tamo odgovara sada vrijednosti $(1-v^2)$, a preostala dužina $(1-s) = v$ tamo odgovara sada vrijednosti v^2. v pokazuje omjer (brzina vrtnje motora) : (sinhrona brzina vrtnje). $(1-v^2)$ jednako je produktu klizanja s prema istohodnom polju i klizanja $(2-s)$ prema protuhodnom polju, što se odmah vidi iz relacije $s = (1-v)$ i $(2-s) = (1+v)$. Kod brzina u blizini sinhrone brzine vrtnje bit će $(1-v^2)$ približno jednako $2s$, pa možemo za točke između praznog hoda i punog opterećenja očitavati klizanje kao kod trofaznog motora, no izmjerenu dužinu moramo dijeliti sa 2. Gubitke u bakru rotora dobivamo praktički točno, ako očitamo »prividno klizanje« $(1-v^2)$, te s ovom vrijednošću pomnožimo snagu u rasporu $N_{zr} = N_1 - N_{g\,statora}$. Vidimo, kako je već gore spomenuto, da gubitke u bakru rotora treba praktički računati s dvostrukim klizanjem.

Za svaku radnu točku P možemo s kružnice očitati statorsku struju, faktor snage i snagu koju motor uzima iz mreže. Korisnu mehaničku snagu možemo približno očitati s pomoću linije snage P_0P_k. Zakretni moment moramo naprotiv odrediti preko korisnosti.

Rotorsku struju frekvencije klizanja I'_2 i rotorsku struju gotovo dvostruke frekvencije I_2'' možemo vrlo približno uzeti s kružnog dijagrama kao dužine PP_0 i PO.

Mjerila određujemo:

mjerilo za primarnu struju . . . 1 mm $= a_1$ A (slobodno odabrano),

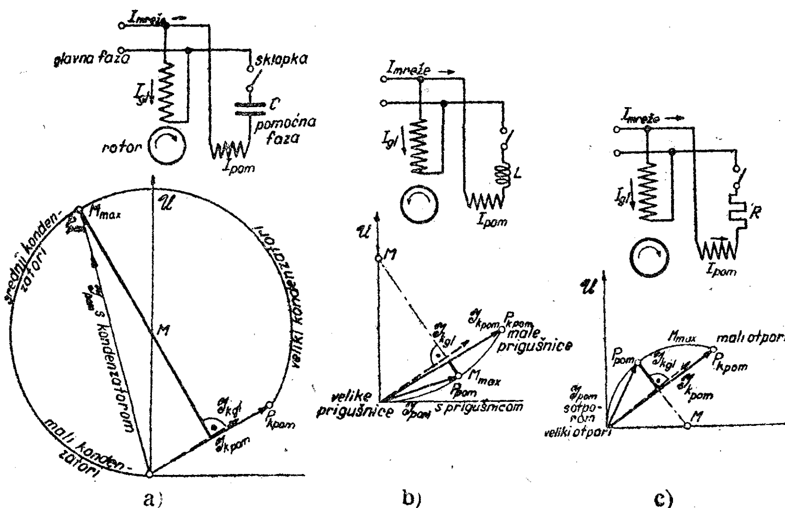
mjerilo za sekundarnu struju . . . 1 mm $= a_2$ A $= a_1 \cdot \dfrac{U_{mreže}}{\sqrt{3} \cdot U_{k l max}}$,

mjerilo za snagu . . . . 1 mm $= w$ W $= U_{mreže} \cdot a_1$.

$U_{k l max}$ predstavlja maksimalni napon, koji se pojavljuje između kliznih koluta kod mjerenja prijenosnog omjera mirnog stroja. Mjerimo ga tako, da zakrećemo rotor, uz stator priključen na napon $U_{mreže}$, tako dugo dok otklon voltmetra ne bude maksimalan.

Dijagram kratkog spoja motora s pomoćnom fazom. Čisto izmjenično polje jednofaznog motora, koji miruje, a priključen je samo glavnim namotom, možemo pretvoriti u više ili manje savršeno okretno polje, ako i kroz pomoćni namot, smješten okomito prema glavnom namotu, šaljemo struju, koja je prema struji u glavnom namotu pomaknuta u fazi po mogućnosti za 90^0. Sl. 60 prikazuje odgovarajući spoj. Da bismo postigli fazni pomak, uključimo u seriju s pomoćnom fazom bilo djelatni, bilo

induktivni ili kapacitivni otpor. Površina trokuta, koji određuje struja kratkog spoja glavnog namota $\mathcal{J}_{k_{gl}}$ i fazno pomaknuta zaletna struja pomoćnog namota $\mathcal{J}_{pom}$, mjera je za potezni moment, koji stroj razvija. Veličina te površine direktno je proporcionalna vertikalnoj udaljenosti polazne točke P_{pom} od vektora struje $\mathcal{J}_{k_{gl}}$. Kod spajanja čisto djelatnog predotpora R_{pred} u krug pomoćne faze putuje ova točka po kružnici, koja prolazi točkom kratkog spoja pomoćnog namota i nul-točkom, a središte joj je na nul-liniji. Polazna točka približava se to više nul-točki, što je veći dodani otpor (sl. 60c).



Sl. 60. Spojevi za zalet i dijagrami kratkog spoja jednofaznog motora s pomoćnom fazom. U dijagramima su unesene točke maksimalnog poteznog momenta. Momenti su prikazani debelo izvučenim dužinama.

Kod upotrebe prigušnice bez gubitaka putuje polazna točka P_{pom} po kružnici, koja i opet prolazi kroz $P_{k_{pom}}$ i 0, a središte joj leži na vertikali kroz 0. Kad induktivni otpor prigušnice raste, približava se ova točka s desna nul-točki. Upotrebljavamo li umjesto prigušnice u seriju spojeni kondenzator, ostaje geometrijsko mjesto za polaznu točku ista kružnica, no polazna točka približava se nul-točki preko gornjeg dijela kružnice, kad kapacitivni otpor raste (sl. 60b, a).

Točke maksimalnog poteznog momenta za tri različita spoja dobivamo tako, da iz središta M kružnice struje u pomoćnom namotu spustimo okomicu na vektor struje u glavnoj fazi $\mathcal{J}_{k_{gl}}$, te ovu produžimo do sjecišta s kružnicom. Sjecište je tražena najbolja polazna točka. Da bismo postigli maksimalni potezni moment, dimenzioniramo otpornike, koje treba dodati u seriju prema ovim formulama:

a) $$R_{pred} = \frac{U_{mreže}}{I_{k\,pom}} \cdot \left(\frac{\sin \varphi_{gl} \sin \varphi_{pom}}{1 - \cos \varphi_{gl}} - \cos \varphi_{pom}\right) \approx \frac{U_{mreže}}{I_{k\,pom}}.$$

Napon na otporniku R_{pred} iznosi cca 57% napona mreže, a struja u otporniku cca 57% struje kratkog spoja pomoćnog namota, uz $\cos\varphi_{gl} \approx$ $\approx \cos\varphi_{pom} \approx 0{,}5$.

$$\text{b)} \quad X_L = \frac{U_{mreže}}{I_{k\,pom}} \cdot \left(\frac{\cos\varphi_{gl} \cdot \cos\varphi_{pom}}{1 - \sin\varphi_{gl}} - \sin\varphi_{pom}\right) \approx \frac{U_{mreže}}{I_{k\,pom}}.$$

Napon na prigušnici iznosi cca 57% napona mreže, a struja cca 57% struje kratkog spoja pomoćnog namota.

$$\text{c)} \quad X_C = \frac{1}{2\pi f \cdot C} = \frac{U_{mreže}}{I_{k\,pom}} \cdot \left(\frac{\cos\varphi_{gl} \cdot \cos\varphi_{pom}}{1 + \sin\varphi_{gl}} + \sin\varphi_{pom}\right) \approx \frac{U_{mreže}}{I_{k\,pom}}.$$

Napon na kondenzatoru iznosi cca

$U_{mreže} / \cos\varphi_{pom}$, a struja cca $I_{k_{pom}} / \cos\varphi_{pom}$.

Ovdje znači: $U_{mreže}$ napon mreže jednofaznog motora, $I_{k_{pom}}$ struju kratkog spoja pomoćnog namota priključenog na puni napon, $\cos\varphi_{pom}$ pripadni faktor snage, te $\cos\varphi_{gl}$ faktor snage u kratkom spoju glavnog namota. Sasvim desno navedene približne formule vrijede sasvim točno, kad se faktori snage u kratkom spoju za glavni i za pomoćni namot međusobno podudaraju. Možemo izvesti slijedeće jednostavno pravilo:

Otpor, koji treba dodati u seriju, bilo djelatni, bilo induktivni ili kapacitivni, treba da bude točno tako velik kao prividni otpor kratkog spoja pomoćnog namota. Njegova vrijednost u omima mora dakle biti $U_{mreže} / I_{k\,pom}$.

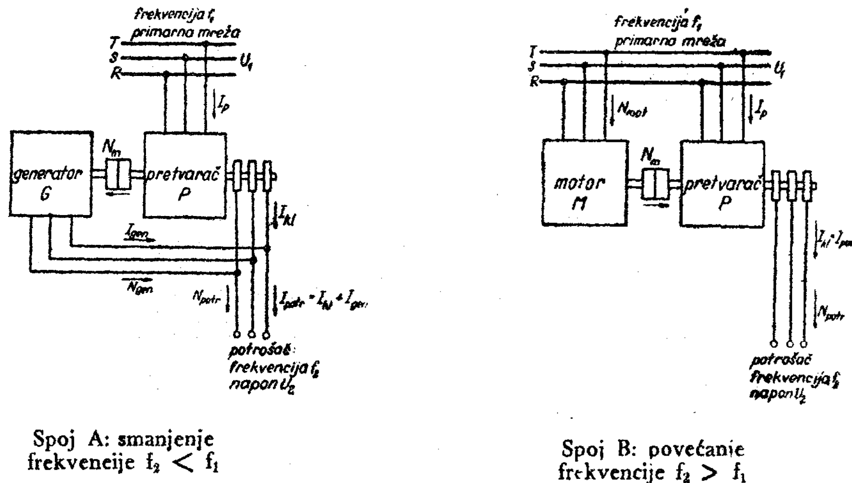
Postizavanje maksimalnog poteznog momenta. Najveće zaletne momente dobivamo općenito s kondenzatorima. Djelatni je otpor bolji od prigušnice, kada faktor snage u kratkom spoju glavnog namota leži ispod 0,7. Prigušnica daje veće momente nego otpornik, kada je faktor snage u kratkom spoju glavnog namota veći od 0,7. Treba primijetiti, da prigušnica pokreće motor u jednom smjeru, a otpornik i kondenzator u drugom. Promjenu smjera vrtnje dobivamo, ako zamijenimo priključke jednog od oba namota.

Jednofazni motori s kondenzatorima često kod pune brzine vrtnje rade i dalje s jednim dijelom kondenzatora u pomoćnoj fazi. Kod upotrebe prigušnice ili otpornika moramo naprotiv pomoćnu fazu nakon dovršenog zaleta bezuvjetno isključiti jednopolnom sklopkom.

Osim prikazanih spojeva, postoji još čitav niz drugačijih rasporeda, od kojih ćemo spomenuti samo one, gdje kao glavni namot upotrebljavamo dvije faze normalno namotanog trofaznog motora u spoju zvijezda, dok treću stezaljku motora preko otpornika, prigušnice ili kondenzatora priključimo na jedan od oba vodiča mreže. Treća faza statora, koja predstavlja pomoćni namot, priključena je onda drugim krajem na sredinu glavne faze.

e) Pretvarač frekvencije

Način rada. Asinhroni stroj u spoju kao pretvarač perioda ili pretvarač frekvencije prikazan je na sl. 61a i b. Kod povećanja frekvencije *(B)* potreban je motor, koji će pretvarač goniti, a kod smanjivanja frek-



Spoj A: smanjenje frekvencije $f_2 < f_1$

Spoj B: povećanje frekvencije $f_2 > f_1$

Sl. 61. Spoj pretvarača frekvencije

vencije (A) mora ga naprotiv generator kočiti. Kod oba stroja brzina vrtnje iznosi:

$$n = (f_1 - f_2) \cdot \frac{120}{2 p_p}.$$

gdje je

f_1 = primarna frekvencija mreže,

f_2 = frekvencija potrošača,

$2p_p$ = broj polova pretvarača.

Negativna brzina vrtnje znači, da stroj ide nasuprot okretnom polju, a pozitivna znači, da stroj ide u smjeru polja.

Djelatne i jalove snage podijelit će se kod stroja bez gubitaka, kao što je to prikazano na sl. 62a i b. Vrijede ove jednadžbe:

1. Smanjivanje frekvencije, dakle $f_2 < f_1$ (spoj *A*)

$$N_{r\,\text{pretvarača}} = N_{r\,\text{potrošača}}$$

$$N_{j\,\text{pretvarača}} = N_{j\,\text{potrošača}} \cdot \frac{f_1}{f_2} + N_{j\,\text{generatora}} \cdot \frac{f_1}{f_2}$$

$$N_{r\,\text{generatora}} = \left(1 - \frac{f_2}{f_1}\right) \cdot N_{r\,\text{potrošača}}.$$

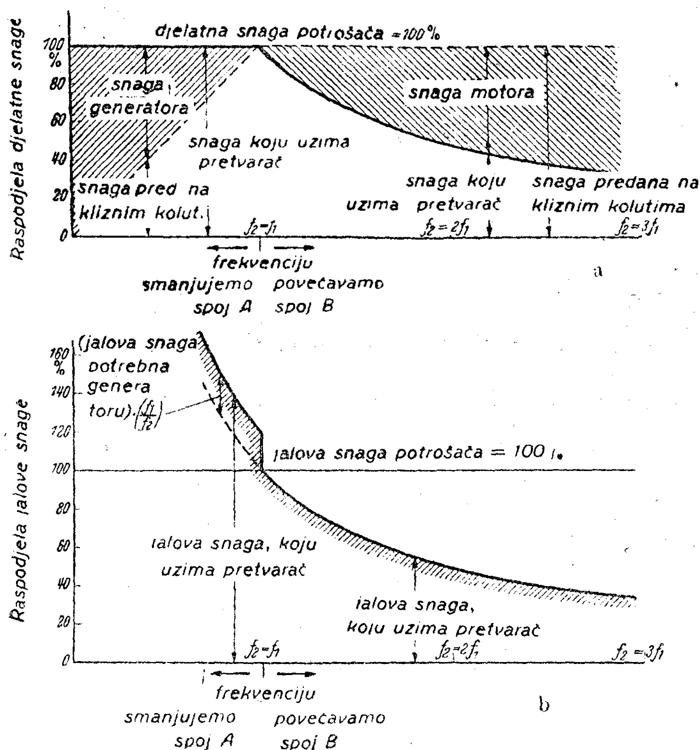
2. Povećavanje frekvencije, dakle $f_2 > f_1$ (spoj B)

$$N_{r\,\text{pretvarača}} = \frac{f_1}{f_2} \cdot N_{r\,\text{potrošača}},$$

$$N_{j\,\text{pretvarača}} = \frac{f_1}{f_2} \cdot N_{j\,\text{potrošača}},$$

$$N_{r\,\text{motora}} = \left(1 - \frac{f_1}{f_2}\right) \cdot N_{r\,\text{potrošača}}.$$

Zbog neizbježivih gubitaka odstupaju snage u stvari znatno od ovih vrijednosti.



Sl. 62. Raspodjela djelatnih i jalovih snaga kod pretvarača frekvencije bez gubitaka

Ispitivanje pretvarača frekvencije sastoji se od pokusa praznog hoda i kratkog spoja pri radnoj brzini vrtnje. Ovi su pokusi potrebni, da bismo mogli nacrtati dijagram. Upotpunjujemo ih mjerenjem prijenosnog omjera i pokusom kratkog spoja na mirnom stroju. Pretvarač opterećujemo po mogućnosti uz ispravni sekundarni faktor snage. Pokus trajnog rada uvijek izvodimo, pri čemu treba osobito pripaziti na ugrijavanje u željezu rotora. Zbog gdjekadašnje vrlo visoke sekundarne frekvencije mogu gubici u željezu biti znatni.

Pokus praznog hoda. Ponajprije odredimo prijenos mirnoga pretvarača, kao kod normalnog asinhronog motora, mjerenjem dovedenog napona mreže U_1 i induciranog napona na kliznim kolutima U_{20}. Prijenos mirovanja izračunavamo:

$$k_{\text{mirovanja}} = \frac{\text{napon mreže}}{\text{napon na kliznim kolutima}},$$

pri čemu ne uzimamo u obzir spoj rotora i statora.

Nakon toga izvedemo isti pokus, kad se stroj okreće nominalnom brzinom vrtnje. Prijenos se sada promijenio u omjeru pretvaranja frekvencije, te iznosi:

$$k_{\text{vrtnje}} = \frac{\text{napon mreže}}{\text{napon na kliznim kolutima kod vrtnje}} = k_{\text{mirovanja}} \cdot \frac{f_1}{f_2},$$

Mjerena snaga, što je stroj uzima, pokriva uglavnom gubitke u željezu. Gubitke trenja i preostatak gubitaka u željezu pokriva pogonski stroj.

Pokus kratkog spoja. Osim normalnog pokusa kratkog spoja na mirnom stroju, koji izvodimo na isti način, kao kod svakog asinhronog motora, izvodimo još jedan pokus kratkog spoja kod nominalne brzine vrtnje. Kod oba pokusa kratkog spoja mjerimo snagu, struju, te po mogućnosti i struju na sekundarnoj strani.

Dijagram pretvarača frekvencije u spoju B. Dijagram pretvarača frekvencije vrijedi za konstantne vrijednosti U_1, f_1 na primarnoj strani, te za konstantnu brzinu vrtnje, t. j. konstantnu sekundarnu frekvenciju f_2. Sastoji se od kružnice, koja prolazi točkom praznog hoda P_0 i točkom kratkog spoja P_{kf_2}, koje smo obje izmjerili pri nominalnoj brzini vrtnje. Za svaku pojedinu vrijednost faktora snage sekundarnog opterećenja vrijedi druga kružnica. Kad vrijednosti $\cos\varphi_2$ padaju, postaje luk između točaka P_0 i P_{kf_2} — koje su zajedničke za sve kružnice — sve plosnatiji, dok ne prijeđe kod određenog faktora snage u pravac. Kod faktora snage blizu nule, središte, koje je dosada bilo dolje, leži gore.

Konstruiramo na slijedeći način: Uzimajući u obzir pripadne faktore snage povučemo od 0 struju praznog hoda i struju kratkog spoja stroja koji rotira. Za obje krajnje točke P_0 i P_{kf_2} i točku P_k kratkog spoja mirnog stroja, koja je tek naznačena, odredimo središte kružnice M. To je normalno središte kružnice motora. Tada povučemo raspolovnicu dužine $P_0P_{kf_2}$, koja naravno prolazi kroz M. Na ovom pravcu leže sva tražena središta kružnica za različite vrijednosti $\cos\varphi_2$. Za određenu vrijednost sekundarnog faktora snage odredit ćemo središte tako, da nanesemo kut

φ_2 u točki P_0 od smjera P_0M, te nađemo sjecište slobodnog kraka sa raspolovnicom dužine $P_0P_{k_{f_2}}$. Sjecište je traženo središte. Kutove faznog zaostajanja, koji praktički najprije dolaze u obzir, nanosimo prema dolje, kutove faznog prethođenja prema gore. Na sl. 63. prikazano je, kako se crta dijagram. Središte je označeno sa $M_{f_2, \cos\varphi_2}$, da bismo se sjetili, da mu položaj zavisi o frekvenciji f_2 kao i o $\cos\varphi_2$. Vidimo, da točka M, koju smo prvo odredili vrijedi za sve sekundarne frekvencije f_2 uz $\cos\varphi_2 = 1{,}0$. To znači, kao što je lako uvidjeti, da je motorski rad asinhronog stroja istovjetan s pogonom pretvarača frekvencije, koji radi na djelatne otpore.

Sl. 63. Kružni dijagram pretvarača frekvencije za $f_2 > f_1$ i ∢ φ_2 faznog zaostajanja. I_2 = struja na kliznim kolutima = struja potrošača u spoju B; $\cos\varphi_2$ = faktor snage na kliznim kolutima = faktor snage potrošača u spoju B.

S pomoću niže izračunanih mjerila možemo s kružnog dijagrama pretvarača frekvencije očitavati: I_1, $\cos\varphi_1$, te N_{1_r} na primarnoj strani, kao i U_{20}, U_2, $\triangle U_2$, I_2, $N_{2\ \text{prividni}}$ te N_{2_r} na sekundarnoj strani. Vrijedi:

primarna struja	=	$OP \cdot a_1$
primarni faktor snage	=	tetiva u cos φ-krugu
primarna prividna snaga	=	$OP \cdot w_1$
primarna djelatna snaga	=	$PA \cdot w_1$
sekundarni napon u praznom hodu	=	$P_0P_{kf_2} \cdot u_2$
sekundarni napon potrošača	=	$PP_{kf_2} \cdot u_2$
sekundarni pad napona	=	$PP'' \cdot u_2$
sekundarna struja	=	$P_0P \cdot a_2$

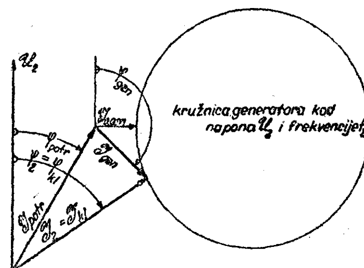
sekundarna prividna snaga = $P_0 P' \cdot w_2$
sekundarna djelatna snaga = $P_0 P' \cdot w_2 \cdot \cos \varphi_2$

Mjerila izračunavamo:

mjerilo za primarnu struju 1 mm = a_1 A (slobodno odabrano)
mjerilo za sekundarnu struju = a_2 A $(= a_1 \cdot U_1 : U_{20 mirovanja})$
mjerilo za primarnu snagu = w_1 W $(= \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot a_1)$
mjerilo za sekundarnu snagu = w_2 W $(= w_1 \cdot f_2/f_1 =$
$= \sqrt{3} \cdot U_{20 vrtnje} \cdot a_2)$
mjerilo za sekundarni napon = u_2 V $\left(= \frac{U_{20 vrtnje}}{P_0 P_{kf_2}}\right)$.

Sl. 64 prikazuje, kako se struja I_2 na kliznim kolutima pretvarača u spoju A sastavlja iz struje potrošača i struje generatora.

Opterećenje. Ma da određivanjem sekundarnog pada napona s kružnog dijagrama dobivamo vrlo pouzdane vrijednosti, ipak ćemo po mogućnosti izvršiti neposredno mjerenje. Za djelatno opterećenje najbolje je odabrati regulacioni otpornik, a za preuzimanje jalovog opterećenja asinhroni stroj u praznom hodu. Njegov napon kod frekvencije f_2 ne smije biti manji od sekundarnog napona pretvarača. Ako mu je struja magnetiziranja premalena, možemo opteretiti i zaustavljenim strojem kao prigušnicom, pri čemu spojimo stator i rotor u seriju radi reguliranja struje. Zakretanjem rotora možemo udesiti najrazličitije vrijednosti induktivnog otpora. Ako smo faze krivo spojili, bit će struje vrlo različite. Pogrešku ćemo ukloniti tako, da zamijenimo dva dovoda do kliznih koluta. Kočna poluga osigurava, da se stroj, koji razvija znatan moment, ne bi okretao. Dovođenjem zraka (komprimirani zrak) treba se pobrinuti za prikladno hlađenje.



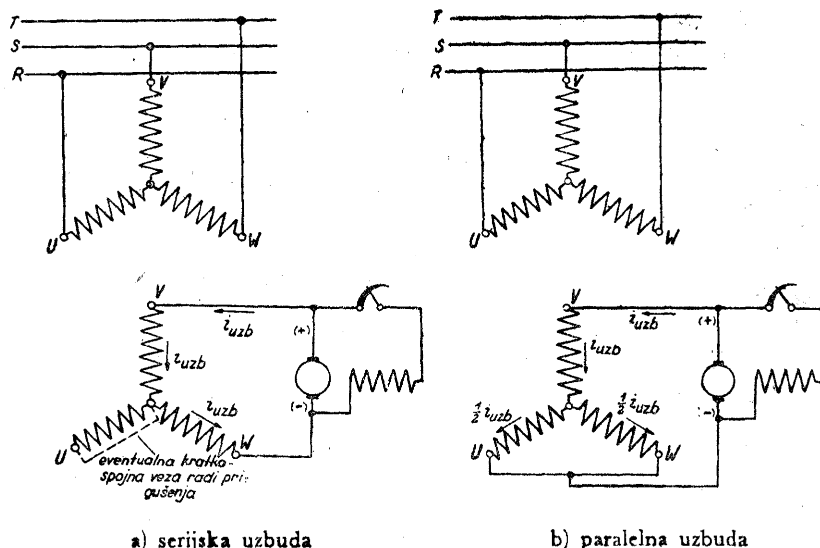
Sl. 64. Određivanje struje I_2 i faktora snage $\cos \varphi_2$ na kliznim kolutima iz struje i faktora snage potrošača i generatora u spoju A. S pomoću I_2 i $\cos \varphi_2$ očitavamo s kružnog dijagrama prema sl. 63 ΔU_2, I_1 i t. d.

f) Sinhronizirani asinhroni stroj

Način rada. Svaki asinhroni stroj možemo uzbudom sekundarnog kruga istosmjernom strujom sinhronizirati i upotrebiti kao sinhroni motor ili generator. Ovakav stroj sjedinjuje prednosti obiju vrsta strojeva. Pokrećemo ga pokretačem uz male struje i po volji jake zakretne momente sve do visine asinhronog prekretnog momenta, a kad stroj ide, možemo faktor

snage udesiti na svaku traženu vrijednost, napose na 1,0 ili na vrijednosti faznog prethođenja. Slaba strana ovih strojeva je mali sinhroni prekretni moment, što je posljedica malog raspora. Povećanjem ovoga ili preuzbudom, možemo, istina, vrijednost prekretnog momenta povećati na 1,3 do 1,4-struku vrijednost nominalnog momenta i više. Paralelnim spajanjem dviju faza rotora ili kratkim spojem jedne faze između priključka i zvjezdišta postizavamo prigušno djelovanje, uvijek poželjno kod sinhronih strojeva.

Spoj sinhroniziranog asinhronog stroja prikazuje sl. 65, i to za sekundarni krug spojen u zvijezdu, što se najviše upotrebljava. Kod većih strojeva spojen je sekundarni krug pri zaletu većinom u trokut, da bismo izbjegli prevelike napone u rotoru, a u radu preklopi se onda kontrolerom u zvijezdu. Rjeđe upotrebljavamo spoj rotora u trokut. Bitna razlika može



a) serijska uzbuda b) paralelna uzbuda

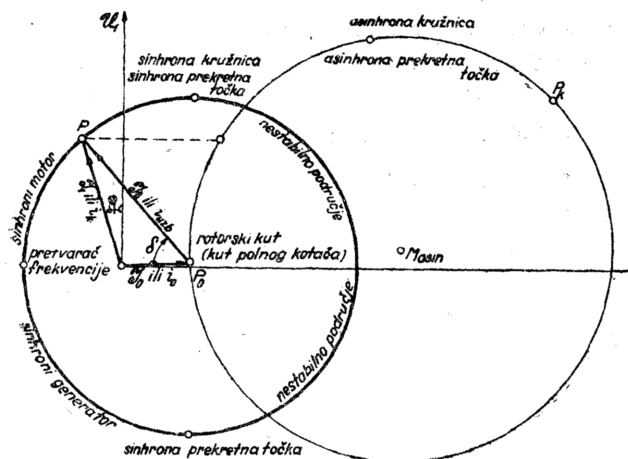
Sl. 65. Spoj sinhroniziranog asinhronog stroja. Uzbuda preko 2 koluta (a) ili preko 3 koluta (b). Uzbudna struja u slučaju (a) $\sqrt{1,5} = 1,23$ puta, u slučaju (b) $\sqrt{2} = 1,41$ puta veća od trofazne sekundarne struje.

biti, bez obzira na spoj rotora, samo u tom, da li uzbudnu struju dovodimo preko jednog koluta, a odvodimo preko drugoga, pri čemu dakle treći kolut ostaje bez struje ili pak odvodimo struju preko dva međusobno kratko spojena koluta. Prvi slučaj zvat ćemo serijskom, a drugi paralelnom uzbudom. Gdjekada, ako je napon mreže malen, a tražimo $\cos \varphi$ faznog prethođenja, promijeni se uloga statora i rotora. Rotor priključimo na mrežu, a stator uzbudimo. Prednost je tu u boljem iskorištenju raspoloživog prostora za namatanje.

Sinhronizirani stroj ispitujemo i kao asinhroni i kao sinhroni stroj. Najbolje je pisati rezultate ispitivanja u dva odgovarajuća ispitna zapi-

snika. Pojedina ispitivanja su slijedeća: mjerenje prijenosa i pokus praznog hoda, kratkog spoja i opterećenja asinhronog motora, i zatim prazni hod, kratki spoj i opterećenje sinhronog stroja, s istosmjernom uzbudom. Snimanje opterećenja sinhronog stroja izvodimo s konstantnom uzbudnom strujom, ako se radi o motoru, jer ovaj obično radi sa stalno udešenom uzbudom puna opterećenja. Generator ispitujemo s konstantnim faktorima snage. Snimanje opterećenja u sinhronom radu nije baš potrebno, jer uzbudnu struju uz određeni faktor snage, i obratno, faktor snage uz određenu uzbudnu struju, možemo odrediti lako i sigurno grafički.

Dijagram sinhroniziranog stroja izvodimo najprikladnije iz dijagrama asinhronog stroja. Na taj način možemo neposredno vidjeti različito ponašanje kod obih vrsta rada. Sl. 66 prikazuje oba povezana dijagrama, koje možemo nacrtati iz rezultata mjerenja asinhronog praznog hoda i



Sl. 66. Dijagram sinhroniziranog asinhronog stroja. (Tanko izvučeno: dijagram normalnog asinhronog stroja.)

asinhronog kratkog spoja. Asinhroni kružni dijagram nacrtan je prema podacima na str. 101, te je za razliku od sinhronog kružnog dijagrama tek tanko izvučen. Ovaj posljednji je kružnica sa središtem u točki praznog hoda P_0, te s uzbudnom strujom kao polumjerom.

Sinhrona kružnica prolazi traženom radnom točkom P. Mjerilo za uzbudnu struju dobivamo iz slijedećeg razmatranja. Kod serijske uzbude stanje je identično s onim momentanim stanjem u asinhronom radu, kada je struja rotora u jednom dovodu jednaka nuli, u drugom jednaka $+0{,}866 \cdot I_{max}$, a u trećem $-0{,}866 \cdot I_{max}$. Kod paralelne uzbude odgovara tome ono momentano stanje, kada u jednom dovodu teče $+I_{max}$, a u svakom od druga dva $-0{,}5 \cdot I_{max}$. Otuda slijedi, da ekvivalentna istosmjerna

struja, kod uzbude preko dva klizna koluta, mora biti $0{,}866 \cdot \sqrt{2} = 1{,}23$ puta, a kod uzbude preko tri klizna koluta $\sqrt{2} = 1{,}41$ puta veća od efektivne izmjenične struje rotora. Mjerilo za uzbudnu struju dobivamo dakle:

kod serijske uzbude preko dva koluta

mjerilo za uzbudnu struju = 1,23 · mjerilo za sekundarnu izmjeničnu struju, te

kod paralelne uzbude preko tri koluta

mjerilo za uzbudnu struju = 1,41 · mjerilo za sekundarnu izmjeničnu struju.

Mjerilo za sekundarnu izmjeničnu struju određujemo u oba slučaja, spomenimo još jednom, na slijedeći način:

mjerilo za sekundarnu izmjeničnu struju =

$$= \text{mjerilo za mrežnu struju} \; \frac{\textbf{napon mreže}}{\textbf{na on na kliznim kolutima}}.$$

Napon na kliznim kolutima je napon, koji mjerimo na kolutima mirnog rotora u radnom spoju. Kao uzbudnu struju uzimamo onu, koju daje izvor energije, kao sekundarnu izmjeničnu struju onu, koja teče u dovodima do kliznih koluta, i kao mrežnu struju onu, koja teče u dovodima od mreže. Prema tome ne promatramo namotne struje, koje su kod spoja u trokut u omjeru $1 : \sqrt{3}$ manje od linijskih. Isto kao kod sinhronih strojeva, umjesto da pođemo od mjerila za primarnu struju, možemo poći i od mjerila za uzbudnu struju, iz kojega onda dobivamo mjerilo za mrežnu struju množenjem sa I_0/i_0 ili sa I_n/i_k. i_0 je uzbudna struja praznog hoda, a i_k kratkog spoja, I_0 mrežna struja kod asinhronog praznog hoda, a I_n nominalna mrežna struja.

Potrebna uzbudna snaga ne zavisi o spoju uzbude, ako izuzmemo utjecaj gubitaka u četkicama i u oba dovoda. Uzbudni napon izračunavamo množenjem struje s djelatnim otporom, te dodavanjem dvostruke vrijednosti pada napona u jednoj četkici i jednom dovodu. Za ovo možemo ukupno uvrstiti 1,0 V, ako uzmemo za svaku četkicu 0,3 i za svaki dovod 0,2 V. Ako je R_{kl} otpor između dva klizna koluta u normalnom spoju rotora, tada uzbudni napon iznosi:

uzbudni napon = uzbudna struja $\cdot R_{kl} + 1{,}0$ kod serijske uzbude

uzbudni napon = uzbudna struja $\cdot \frac{3}{4} \cdot R_{kl} + 1{,}0$ kod paralelne uzbude.

Za brzu procjenu uzbudne struje, koja je potrebna, da bi asinhroni motor sinhroniziran radio sa $\cos\varphi = 1{,}0$, možemo upotrebiti slijedeće formule:

kod serijske uzbude preko dva koluta

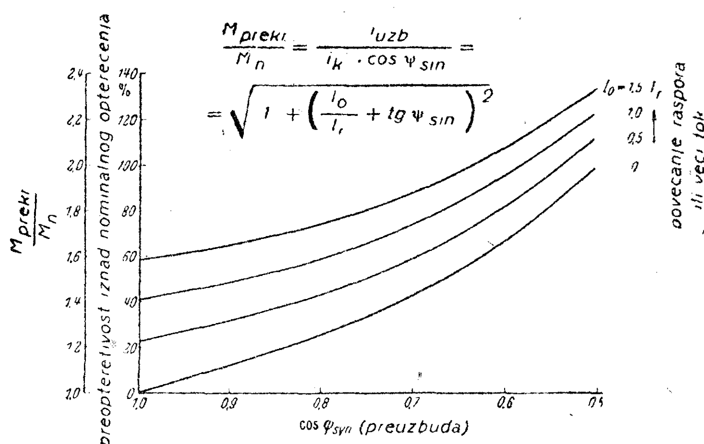
$$i_{uzb\,ist} = 1{,}23 \cdot \frac{1000 \cdot N}{\sqrt{3} \cdot U_{kl} \cdot \eta \cdot \cos\varphi_{as}} \approx \frac{780 \; N}{U_{kl} \;\; \cos\varphi_{as}},$$

kod paralelne uzbude preko tri koluta

$$i_{uzb\,ist} = 1{,}41 \cdot \frac{1000 \cdot N}{\sqrt{3} \cdot U_{kl} \quad \eta \quad \cos\varphi_{as}} \approx \frac{900 \cdot N}{U_{kl} \cdot \cos\varphi_{as}}.$$

Pri tome znači: N predanu snagu u kW, U_{kl} napon između kliznih koluta, kad motor stoji, uz pogonski spoj rotora, te η i $\cos\varphi_{as}$ korisnost i faktor snage asinhronog motora. Na pr., asinhroni motor za 375 kW, s naponom mirnog rotora 780 V, korisnošću 92,5%, i faktorom snage 0,85 treba uzbuditi sa 435 A preko dva koluta, ili sa 500 A preko tri koluta. Približne formule na desnoj strani pretpostavljaju korisnost 91%.

Preopteretivost. Promatranje obiju kružnica za sinhroni i asinhroni rad pokazuje, da je *preopteretivost* sinhroniziranog stroja znatno manja, ali je možemo povećati pomicanjem točke nominalnog opterećenja P nalijevo prema točki praznog hoda P_0. Potrebna je veća uzbuda, u slučaju da smo pomicanje postigli radom s $\cos\varphi$ faznog prethođenja, kao i u slučaju povećanja uzbudne struje zbog odgovarajućeg povećanja raspora.



Sl. 67. Preopteretivost sinhroniziranog asinhronog stroja u zavisnosti o omjeru (struja praznog hoda: djelatna struja) i o sinhronom faktoru snage.

Preopteretivost sinhronog stroja u radu sa $\cos\varphi = 1{,}0$ možemo lako procijeniti sa $p = M_{prekr}/M_n = 1/\cos\varphi_{as}$. Preopteretivost gornjeg motora bila bi dakle $1/0{,}85 = 1{,}17$. U radu s bilo kojim $\cos\varphi_{sin}$ faznog prethođenja možemo odrediti preopteretivost kao:

$$p = M_{prekr}/M_n \approx \frac{i_{uzb}}{i_k \cdot \cos\varphi_{sin}},$$

pri čemu je i_{uzb} faktična uzbudna struja, a i_k uzbudna struja, koja je potrebna u kratkom spoju s nominalnom strujom.

Ako poznajemo struju asinhronog praznog hoda I_0 i djelatnu struju I_r, možemo računati p u zavisnosti o sinhronom $\cos\varphi_{sin}$:

$$p = \frac{M_{prekr}}{M_n} = \sqrt{\frac{1}{\cos^2\varphi_{sin}} + \left(\frac{I_0}{I_r}\right)^2 + 2\cdot\frac{I_0}{I_r}\operatorname{tg}\varphi_{sin}} =$$

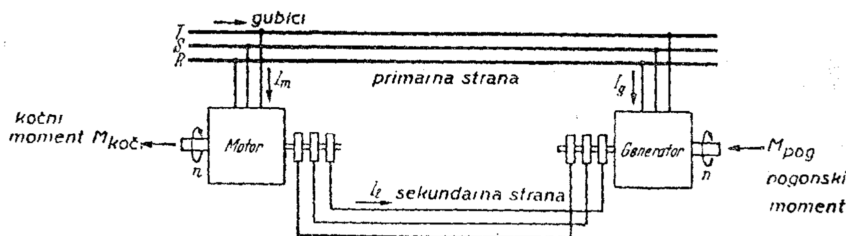
$$= \sqrt{1 + \left(\frac{I_0}{I_r} + \operatorname{tg}\varphi_{sin}\right)^2}.$$

Vidimo, da velika struja praznog hoda, dakle velik raspor, i faktor snage, koji odgovara jakom faznom prethođenju, povoljno utječu na prekretni moment. Na sl. 67 prikazane su navedene relacije krivuljama.

Ne moramo se odviše bojati zbog male sinhrone preopteretivosti, ako radimo s paralelnim spojem faza ili s jednom fazom rotora kratko spojenom, jer stroj, kad ispadne iz koraka, ostaje jako asinhrono preopteretiv, i kad preopterećenje spadne, većinom sam ponovno upadne u korak.

g) Električka osovina

Sastav. Dva jednako velika asinhrona stroja, spojena prema sl. 68, sačinjavaju t. zv. električku osovinu, koja se u bitnosti ponaša kao ispod



Električka osovina. Rotor motora zaostaje prostorno za rotorom generatora za kut α_{el}/p.



Mehanička osovina. Spojka K_2 zaostaje zbog torzije za spojkom K_1 za kut α.

Sl. 68 Električka osovina. Snaga se prenosi preko primarne strane kod vrtnje u smjeru polja, a preko sekundarne strane kod vrtnje nasuprot smjeru polja. Kod mehaničke osovine kočni moment $M_{koč}$ manji je od pogonskog momenta M_{pog} zbog trenja u ležajima. Kod električke osovine bit će kod vrtnje u smjeru polja veći, a kod vrtnje nasuprot smjeru polja manji od ovoga.

toga prikazana mehanička osovina. Oba kraja osovine imaju točno istu brzinu vrtnje, a pogonski kraj zakrenut je prema gonjenom kraju za kut, koji zavisi o opterećenju. Bitna je razlika samo u tome, što je kod mehaničke osovine predani kočni moment $M_{koč}$ uvijek manji od dovedenog pogonskog momenta M_{pog} zbog neizbježivih gubitaka trenja, dok kod električke oso-

vine može, naprotiv, nastupiti slučaj, da predani zakretni moment bude veći. Električka osovina može dakle raditi s mehaničkom korisnošću većom od 1,0, i to kod vrtnje u smjeru okretnog polja. Kod vrtnje nasuprot okretnom polju predaje električka osovina manji zakretni moment, nego što joj dovodimo, prema tome ona prenosi sa korisnošću manjom od 1,0.

U električku osovinu možemo spojiti i više od dva stroja, koji mogu biti i različito veliki, samo moraju biti međusobno jednaki naponi primarnih i sekundarnih strana. Dalje ćemo obrađivati samo praktički najvažniji slučaj dvaju jednakih strojeva.

Način rada osovine ukratko je ovaj. Stroj, kojemu dovodimo pogonski moment M_{rg}, dakle moment u smjeru mehaničke vrtnje, nastoji da se ubrza i da pođe naprijed prema drugom stroju. To izaziva pomak u fazi među sekundarno induciranim naponima, te nastaje struja izjednačenja. Gonjeni stroj postaje generator, a drugi motor. Snage se izmjenjuju preko primarnih strana, kad električka osovina ide u smjeru okretnog polja, a preko sekundarnih strana, kad ona ide nasuprot okretnom polju. Preostala snaga klizanja ide obratnim putem.

Pogonski moment i kočni moment možemo unutar stabilnog radnog područja povećavati samo do određene maksimalne vrijednosti. Prekoračimo li ovu, osovina se raspadne. Kod vrtnje u smjeru polja granicu predstavlja najveći dopustivi pogonski moment, kod vrtnje nasuprot smjeru polja najveći dopustivi kočni moment.

Dijagram. Ove odnose možemo najpreglednije vidjeti s dijagrama osovine prema sl. 69a, b. Dijagram vrijedi za konstantnu brzinu vrtnje, dakle konstantno klizanje prema okretnom polju. Određujemo ga kao kružnicu kroz točku praznog hoda P_0 i točku kratkog spoja P_s, koja pripada klizanju s, s promjerom jednakim P_0P_s Obje točke leže na normalnom kružnom dijagramu. P određujemo uobičajenom grafičkom konstrukcijom ili pravim pokusom kratkog spoja na jednom motoru osovine, koji ide radnom brzinom vrtnje. Kod konstrukcije ili kod pokusa treba vlastitom otporu stroja dodati polovinu otpora, koji predstavlja sekundarni priključni vod na licu mjesta. Točke za oba stroja, koje spadaju zajedno, dobivamo tako, da električki kut zakreta α nanesemo u središtu M_{os} od polumjera $M_{os}P_0$ prema gore i prema dolje. Radne točke leže, prema slijedećoj tabeli, na gornjem ili na donjem dijelu kružnice:

	vrtnja u smjeru polja	nasuprot smjeru polja
generator osovine	donja polovina	gornja polovina kružnice
motor osovine	gornja polovina	donja polovina kružnice

P_m je radna točka opterećenog stroja, dakle motora osovine, a P_g radna točka gonjenog stroja, dakle generatora osovine.

Prividno proturječje, da struja generatora u dijagramu (sl. 69b) kod vrtnje nasuprot smjeru polja gleda prema gore, dok je struja motora okrenuta prema dolje, možemo rastumačiti tako, što dijagram, koji vrijedi samo za primarnu stranu pri ovom radnom stanju, ne prikazuje korisnu snagu, koja se izmjenjuje na sekundarnoj strani, već preostalu snagu klizanja, koja se vraća na primarnoj strani. Dijagram upotrebljavamo s pomoću uobičajenih mjerila za struje i snagu a_1, a_2 i w, koja izračunavamo kao kod asinhronog motora. Dobivamo:

primarna struja generatora $I_{gen} = OP_g \cdot a_1$,

primarna struja motora $I_{mot} = OP_m \cdot a_1$,

sekundarna struja $I_2 = P_0 P_g \cdot a_2 = P_0 P_m \cdot a_2$,

pogonski moment = zakretni moment generatora

$$M_{pog} = \left(P_g A_g \cdot w \pm I_g^2 \cdot R_1 \cdot m_1 \right) \frac{0{,}973}{n_{sin}}, \qquad \begin{matrix} + \text{ kod } s < 1 \\ - \text{ kod } s > 1 \end{matrix}$$

kočni moment = zakretni moment motora

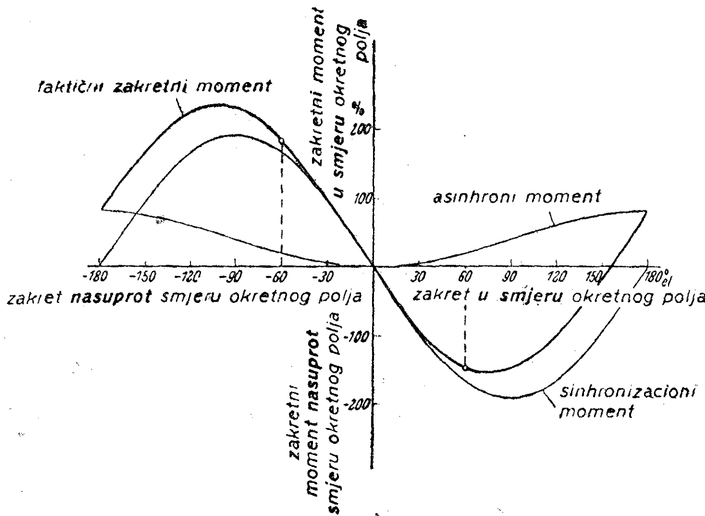
$$M_{koč} = (P_m A_m \cdot w \pm I_m^2 \cdot R_1 \cdot m_1) \frac{0{,}973}{n_{sin}}. \qquad \begin{matrix} - \text{ kod } s < 1 \\ + \text{ kod } s > 1 \end{matrix}$$

Sl. 69. Kružni dijagram električke osovine, uz polovinu sinhrone brzine vrtnje. Vrtnja u smjeru polja (a), odnosno nasuprot smjeru polja (b).

Granica stabilnosti dosegnuta je, općenito, kad zakretni moment, koji možemo uzeti s donjeg dijela dijagrama, prekorači svoju maksimalnu vrijednost. Pripadna točka leži nešto dalje desno od točke upravo ispod sre-

dišta kružnice, no ovu možemo, kako je na sl. 69 prikazano, smatrati kritičnom točkom, da bismo zadržali stanovitu sigurnost.

Na sl. 70 prikazano je, kako teče zakretni moment kod mirovanja u zavisnosti o kutu zakreta α. Faktični zakretni moment možemo rastaviti na »sinhronizacioni« i »asinhroni« dio, od kojih prvi uzrokuje sinhroni rad osovine, dok drugi nastoji potjerati oba stroja kao asinhrone motore na sinhronu brzinu vrtnje. To im međutim uvijek priječe pogonski strojevi ili priključeno opterećenje.



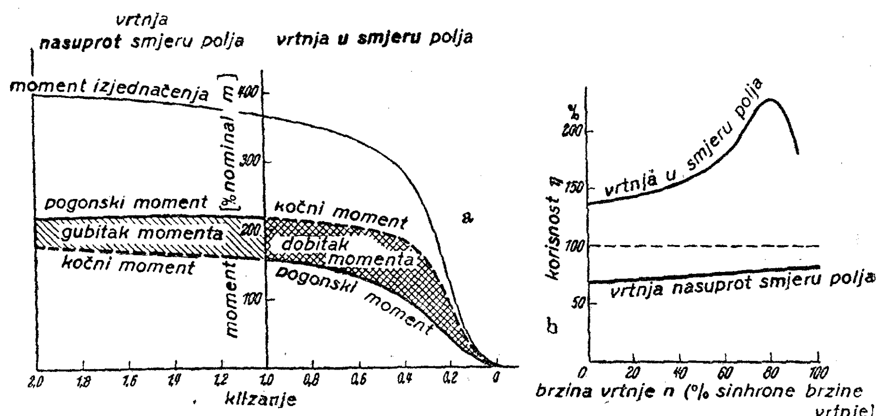
Sl. 70. Zakretni moment električne osovine kod mirovanja. Isti pozitivni i negativni kutovi daju za oba stroja vrijednosti, koje spadaju zajedno. »Faktični zakretni moment« sastoji se od »sinhronizacionog« i od »asinhronog« dijela. Prvi nastoji ukinuti zakret za kut α, posljednji uzrokuje, kad nema opterećenja, da se zajednički zalete kao asinhroni motori u smjeru okretnog polja.

Sl. 71a prikazuje, kako se mijenjaju maksimalni dopustivi momenti unutar stabilnog područja u zavisnosti o klizanju. Vidimo, da osovina kod vrtnje nasuprot smjeru okretnog polja uzima veći moment no što ga daje, dok se kod vrtnje u smjeru polja ponaša obratno. Mehanička korisnost, kao omjer predanoga i primljenoga, bit će zato u prvom slučaju manja, u drugom veća od 1,0. Ukupna korisnost, uključivši gubitke, koji se pokrivaju preko mreže, bit će naravno manja od 1,0. Mehaničke korisnosti kod maksimalnog opterećenja prikazane su na sl. 71b.

Radna osovina. Kod uređaja prema sl. 72, pogonski motor P tjera generator osovine S_1 pogonskim momentom M_{pog}. Ovaj predaje svoju generatorsku snagu motoru osovine S_2, koji onda momentom $M_{koč}$, što ga razvija, goni faktični korisni teret.

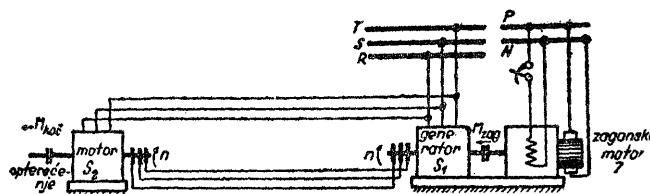
Kod *vrtnje u smjeru* polja M_{pog} je manji od $M_{koč}$, tako da pogonski motor *P* ne mora dati ni puni zakretni moment korisnog opterećenja.

Stabilna opteretivost slobodnog motora osovine S_2 mora biti točno jednaka ili nešto veća od najvećeg momenta opterećenja, koji može nastupiti. Pravi radni motor *P* ne mora naprotiv svladavati puni moment opterećenja, jer sama osovina pridonosi ($M_{koč}$ — M_{pog}).



Sl. 71. Maksimalne vrijednosti pogonskog momenta, kočnog momenta i momenta izjednačenja električke osovine unutar stabilnog područja (a), kao i »mehanička korisnost« jednaka (kočni moment): (pogonski moment), u zavisnosti o klizanju, odnosno brzini vrtnje (b).

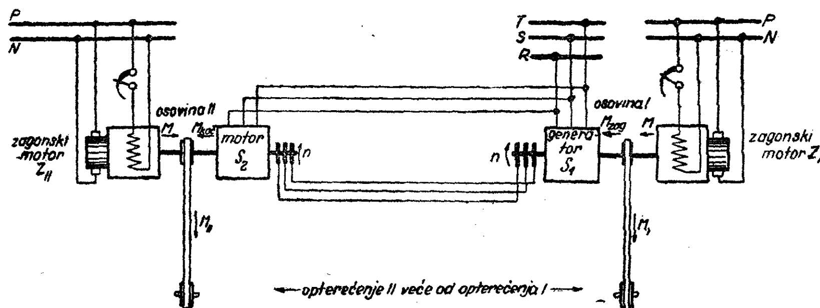
Kod *vrtnje nasuprot smjeru polja* prilike su manje povoljne. Maksimalni stabilni moment slobodnog motora S_2 treba sada uzeti s donjeg dijela dijagrama. Ma da se kružnica dijagrama kod klizanja većeg od 1 povećala, nismo baš mnogo dobili na zakretnom momentu. Osim toga, pogonski stroj *P* ne samo što mora svladavati moment opterećenja, nego još mora pokriti i gubitak momenta u osovini (M_{pog} — $M_{koč}$).



Sl. 72. Električka radna osovina. Motor osovine S_2 mora preuzeti čitavo opterećenje.

Osovina za izjednačenje. Osovina za izjednačenje u spoju, koji je prikazan na sl. 73, služi samo za održavanje potpuno jednakih brzina obiju opterećenih osovina I i II. Ondje zahvaća korisno opterećenje s momentima M i M_{II} koje pokrivaju uglavnom bilo kakva dva međusobno jednaka po-

gonska stroja P_I i P_{II}. Ako su oba momenta opterećenja jednako velika, i ako oba pogonska stroja imaju, što moramo pretpostavljati, istu karakteristiku brzine vrtnje, oni će biti jednako opterećeni. No to vrijedi i onda, kad nastanu bilo kakve razlike između momenata M_I i M_{II}, jer električka osovina S_1, S_2 održava istu brzinu vrtnje, te oba pogonska motora zbog toga moraju raditi na istoj točki svoje karakteristike brzina vrtnje—zakretni



Sl. 73. Električka osovina za izjednačenje. Osovina održava istu brzinu vrtnje time, što izjednačuje razliku momenta opterećenja ($M_{II} - M_I$). Oba pogonska motora su jednako opterećena.

moment. Ako pretpostavimo veće opterećenje osovine II, dobivamo ove jednadžbe:

$$M = M_I + M_{pog},$$
$$M = M_{II} - M_{koč},$$

a odatle izlazi:
$$M_{II} - M_I = M_{pog} + M_{koč}.$$

Suma primljenog i predanog zakretnog momenta električke osovine jednaka je dakle razlici momenata opterećenja na obje strane. Odavle slijedi važna činjenica, da je najveća razlika zakretnih momenata, koju osovina još može svladati, jednaka zbroju primljenog i predanog momenta na granici stabilnog područja. Koji je od njih pri tom veći, to nema značenja za sposobnost izjednačivanja. Sa sl. 71a možemo razabrati, da vrtnja nasuprot smjeru polja daje veće vrijednosti.

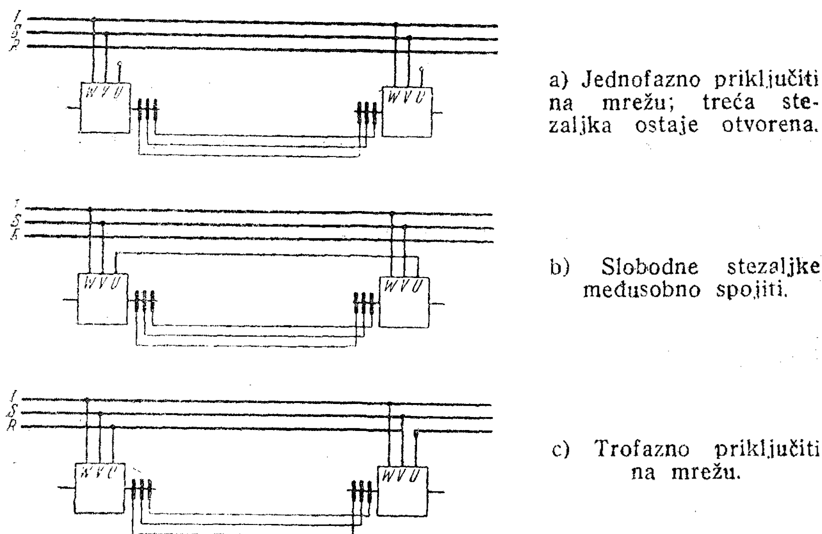
Vrtnja u smjeru ili nasuprot smjeru polja bitno utječe na opterećenje pogonskih strojeva P_I i P_{II}. Kod idealne električke osovine svaki bi od njih i kod različitih opterećenja trebao da daje točno polovinu sume M_I i M_{II}, te ne bi ni osjetio razlike, koje bi nastupile. Kod stvarne osovine s njenim gubicima slučaj je takav, da kod nastale razlike u opterećenju dolazi do dodatnog opterećenja, kad osovina ide nasuprot smjeru polja, a naprotiv do rasterećenja, kad ide u smjeru polja. To odmah proizlazi iz ovih formula, kad uzmemo u obzir tok krivulja na sl. 71a:

vrtnja u smjeru polja $M = \frac{1}{2} \cdot (M_I + M_{II}) - \frac{1}{2} \cdot (M_{koč} - M_{pog})$,

vrtnja nasuprot smjeru polja $M = \frac{1}{2} \cdot (M_I + M_{II}) + \frac{1}{2} \cdot (M_{pog} - M_{koč})$.

Kako su izrazi u drugoj zagradi pozitivni, vidimo, da će osovina u prvom slučaju sudjelovati kod pokrivanja momenata opterećenja, dok će u drugom slučaju pogonske motore dodatno opteretiti.

Često zahtijevamo, da električka osovina za izjednačenje radi i kao radna osovina, i to onda, kada jedan od pravih pogonskih motora, zbog kvara, ispadne iz rada, a rad ne smijemo prekinuti. Potrebno je u tom slučaju, da slobodni motor osovine može davati čitav, maksimalno mogući moment opterećenja na svojoj strani. Vrijede iste jednadžbe kao gore za radnu osovinu. Osobito treba paziti na to, da pogonski motor, koji je ostao čitav, treba sada da daje dvostruko svoje nominalno opterećenje, plus gubitak u osovini kod vrtnje nasuprot smjeru polja, odnosno minus »dobitak« u osovini kod vrtnje u smjeru polja. Praktički ćemo imati slučaj, da on



Sl. 74. Samostalna sinhronizacija u tri stepena električke osovine, koja miruje.

radi na pr. sa 180 ili 220% svoga nominalnog opterećenja, prema smjeru okretnog polja u osovini. Kod asinhronih pogonskih motora postoji dakle gdjekada opasnost, da se zaustave.

Sinhronizacija. Prije nego pokrenemo pogonske motore, moramo osovinu, koja miruje, sinhronizirati. To činimo tako, da tičemo jedan od oba pogonska stroja i time pomičemo rotor za mali kut tako dugo, dok ne nestane razlike napona na sekundarnoj strani obaju već uzbuđenih strojeva osovine S_1 i S_2. Tada stoje oba ispravno i možemo ih spojiti. Većinom upotrebljavamo radije samostalnu sinhronizaciju uz čvrsto spojene kolute prema sl. 74. Primarne strane priključimo prvo dvopolno na mrežu, tada spojimo njihove slobodne stezaljke, i napokon priključimo i ove na mrežu.

Tako ćemo postići sinhronizaciju korak po korak, bez opasnosti, da se osovina zaleti, što se inače kod direktnog tropolnog priključivanja može dogoditi.

Kod *isključivanja* pogonskih motora primarni namoti osovine treba da ostanu priključeni na mrežu sve do mirovanja, kako bi bilo osigurano sinhrono zaustavljanje, i kako bismo izbjegli ponovnu sinhronizaciju.

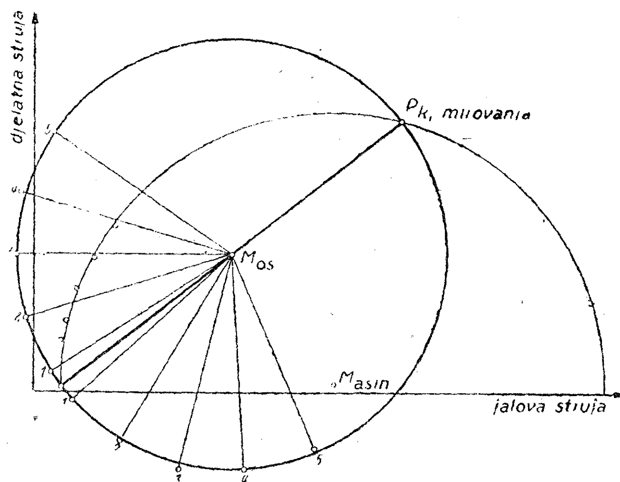
Kod promjene smjera vrtnje treba zamijeniti smjer okretanja polja u oba stroja. To smijemo izvršiti, što je lako razumjeti, samo zamjenom dvaju istih dovoda od mreže, dakle na pr. *S* i *T* na jednom i također *S* i *T* na drugom statoru, jer bismo inače izgubili sinhroni položaj rotora. Najbolje je zato zamijeniti zajedničke dovode od mreže.

Sklonost njihanju. Dva neopterećena, sinhronizirana asinhrona stroja mogu, općenito, ići sinhrono bez njihanja, samo ako im umjetno povećamo gubitke. Ovi gubici nisu poželjni, zbog pogoršanja korisnosti. Kod njihanja u praktičkom radu dolazi do tako velikog dodatnog utroška energije zbog mehaničkih otpora i prigušenja, da se ono ne može dalje razvijati. U ispitnoj stanici osiguravamo potrebno osnovno opterećenje dovoljno velikim, spojkom priključenim, strojevima za opterećenje. Osovina ipak ostaje osjetljiva za jaka i nagla kolebanja u opterećenju, te ih stoga moramo izbjegavati i kod ispitivanja.

Ispitivanje. Ispitivanje osovine sastoji se od pokusa praznog hoda i kratkog spoja kod nominalne brzine vrtnje i propisanog smjera okretnog polja. Zbog točnosti, kojom možemo crtati dijagram i koristiti se njime, nisu sama po sebi potrebna neposredna mjerenja zakretnog momenta i kuta zakreta. Treba li ova ipak provesti, izvodimo pokus pri mirovanju, jer tako zahtijeva najmanje sredstava. Ne dobivamo iste rezultate kao kod vrtnje, ali se ovi dovoljno slažu s rezultatima na dijagramu. Oba motora osovine snabdijemo polugom i uređajem za mjerenje sile (vaga s perom). Zatim pažljivo sinhroniziramo i spojimo rotore paralelno. Sada počnemo zakretati jednu polugu, i pri tome mjerimo zakretni moment na ovoj kao i na drugoj polugi. Osim toga treba očitavati električke veličine. Međusobni električki kut zakreta α mjerimo tako, da odredimo prostorni zakret svake osovine, zbrojimo oba i pomnožimo sa $2p/2$. Pokus ponavljamo za različite položaje. Čim primljeni ili predani zakretni moment kod daljnjeg zakretanja više ne raste, prekinemo pokus, jer se približavamo nestabilnom području. Čitav pokus ponovimo s nepromijenjenim uređajem, ali obrnutim smjerom okretnog polja. Na taj način dobivamo krivulje za zakretanje u smjeru polja i nasuprot smjeru polja. Moment, koji izvodimo rukom, dakle moment doveden osovini, veći je od predanog, kad rotor zakrećemo nasuprot okretnom polju, a manji od njega, kad ga zakrećemo s okretnim poljem.

Želimo li izvesti pokuse pri vrtnji, najbolje je, da odaberemo dinamo-vagu kao pomoćni stroj, jer tako možemo odrediti vrlo točno i jednostavno oba momenta. Stroboskopskim osvjetljavanjem osovina možemo vrlo točno odrediti i kutove zakreta.

Kod ispitivanja čitavog uređaja, dakle električke osovine zajedno s pravim pogonskim motorima, spojimo po jedan motor osovine i pogonski motor sa strojem za opterećenje ispitne stanice. S pomoću ovih možemo onda na obje grupe udesiti i mjeriti sva radna stanja bilo kojeg jednakog ili nejednakog opterećenja. Osim toga možemo preispitati zajednički zalet i zaustavljanje, kao i sinhroni rad. Ovaj posljednji kontroliramo najjedno-



Sl. 75. Kružni dijagram električke osovine određen mjerenjem pri mirovanju. Tanko je ucrtan kružni dijagram samo jednoga od oba motora.

stavnije s dva brojila okretaja, koja pri mirovanju priključimo, i kod ponovnog mirovanja očitamo. Kod prekida osovine moramo najhitnije isklopiti, jer je snaga kratkog spoja motora osovine zbog većinom malog broja polova i razmjerno visokog zasićenja (prekretni moment!) vrlo velika.

Normalno ispitivanje motora osovine kao asinhronih motora većinom izvodimo prije specijalnog ispitivanja.

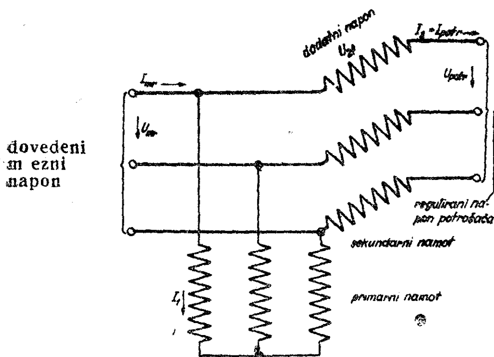
Na sl. 75 prikazan je dijagram električke osovine, dobiven mjerenjem pri mirovanju, u kojemu je tanko ucrtan i normalni motorski dijagram. Vidimo, kako se mjerenje i dijagram dobro slažu.

h) Zakretni transformatori

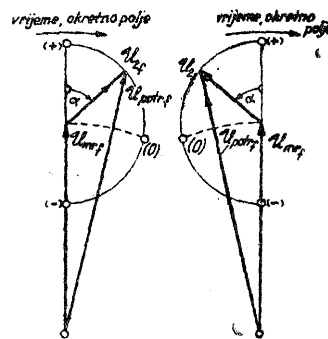
Zakretni transformator je asinhroni stroj s rotorom, koji miruje, ali ga možemo zakretati. Primarni namot, koji je često smješten na rotoru, priključen je na mrežu napona U_{mr}. U sekundarnom namotu dobivamo u

praznom hodu napon $U_{..}$, a kod opterećenja napon U_2, koji je manji za pad napona ΔU_2. Primarna je strana spojena u zvijezdu, rjeđe u trokut, dok je spoj faza sekundarne strane većinom otvoren. Kod višefaznih transformatora zakrećemo sekundarni napon u fazi, kad okrećemo rotor, dok mu veličina ostaje nepromijenjena. Kod jednofaznih zakretnih transformatora mijenja se naprotiv veličina napona sve do nule, dok fazni položaj ostaje nepromijenjen, jednak onome primarnog napona. Obje vrste zakretnih transformatora bitno se dakle razlikuju.

Trofazni zakretni transformator. Trofazni zakretni transformator u štednom spoju prema sl. 76 upotrebljavamo uglavnom, da bismo regulirali priključeni napon mreže U_{mr} za male iznose na napon potrošača U_{potr}, koji treba držati konstantnim ili ga mijenjati u uskim granicama. Ako je U_{2of} fazni napon sekundarnog namota u praznom hodu, tada možemo U_{potr} regulirati u granicama: $U_{mr} \pm \sqrt{3} \cdot U_{2of} = U_{mr}\ (1 \pm k_{21})$. k_{21} jednako je prijenosu $\sqrt{3} \cdot U_{2of} / U_{mr}$. Vlastita snaga zakretnog transformatora samo je mali dio snage, koja kroza nj prolazi — kao i kod normalnog štednog



Sl. 76. Spoj trofaznog zakretnog transformatora za regulaciju napona.
$(U_{potr} = U_{mr} + U_{2f} \sqrt{3} \quad I_{mr} = I_1 + I_{potr})$.



a) Zakret dodatnog napona U_{2f} u smislu okretnog polja.

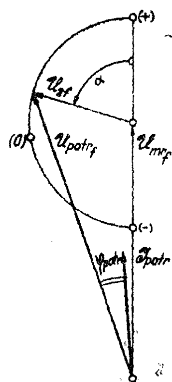
b) Zakret dodatnog napona U_{2f} nasuprot smjeru okretnog polja.

Sl 77. Dijagram napona trofaznog zakretnog transformatora. Točke (+), (0) i (—) odgovaraju najvećem, srednjem i najmanjem naponu potrošača U_{potr_f}.

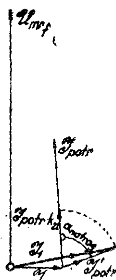
transformatora. Prosječni omjer iznosi $\sqrt{3} \cdot U_{2of} : U_{mr}$. Pojednostavnjeni dijagram napona na sl. 77, u kojemu su zanemareni padovi napona, pokazuje nam, kako se oba fazna napona, U_{mr_f} primarnog namota, i U_{2_f} sekundarnog namota, koji možemo zakretati u fazi, sastavljaju u ukupni napon

potrošača U_{potr_f}. Inducirani sekundarni napon U_{2_f} možemo zakretati, u cilju smanjivanja napona, ili u smjeru, ili nasuprot smjeru okretnog polja u zakretnom transformatoru. Napon U_{potr} mijenja se u oba slučaja u istoj mjeri, mala razlika u faznom položaju prema U_{mr} ne interesira nas dalje. Kod pretežno djelatnog opterećenja na strani potrošača, što je većinom slučaj, preporučuje se zakretanje samo u tom smislu, da inducirani napon sekundarnog namota zakrećemo u smjeru okretnog polja, kad želimo smanjiti napon potrošača. Odavle dobivamo pravila:

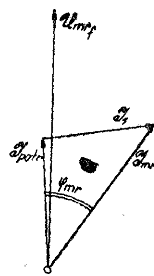
a) Sekundarni napon $\mathfrak{U}_{2f}$ zakrenut iz (+) - položaja *nasuprot* smjeru okretnog polja. (Nepovoljno, jer je struja $\mathfrak{I}_1$ velika!)



Dijagram napona sa strujom potrošača $\mathfrak{I}_{potr}$.

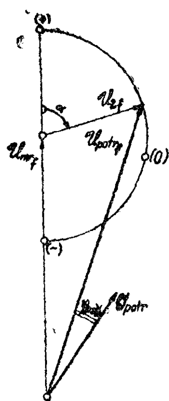


Određivanje struje $\mathfrak{I}_1$ u primarnom namotu. $k_{21} = U_{20f}/U_{mrf}$.

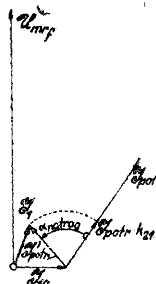


Određivanje mrežne struje $\mathfrak{I}_{mr}$.

b) Sekundarni napon $\mathfrak{U}_{2f}$ zakrenut iz (+) - položaja *u smislu* okretnog polja. (Povoljno, jer je struja $\mathfrak{I}_1$ mala!)



Dijagram napona sa strujom potrošača $\mathfrak{I}_{potr}$.



Određivanje struje $\mathfrak{I}_1$ u primarnom namotu. $k_{21} = U_{20f}/U_{mr}$.



Određivanje mrežne struje $\mathfrak{I}_{mr}$

Sl. 78. Dijagram napona i struje trofaznog zakretnog transformatora u spoju prema sl. 76. Treba uvažiti, da $\mathfrak{I}'_{potr}$ dobivamo iz $\mathfrak{I}_{potr} \cdot k_{21}$ zakretanjem za kut α prema *natrag*.

Statorski pojeni zakretni transformator kod smanjivanja predanog napona mehanički zakrećemo u smjeru okretnog polja. Kod povećanja predanog napona zakrećemo ga nasuprot smjeru okretnog polja.

Rotorski pojeni zakretni transformator kod smanjivanja predanog napona mehanički zakrećemo nasuprot smjeru okretnog polja. Kod povećanja predanog napona zakrećemo ga u smjeru okretnog polja.

Oba pravila možemo sažeti u jedno zajedničko pravilo:

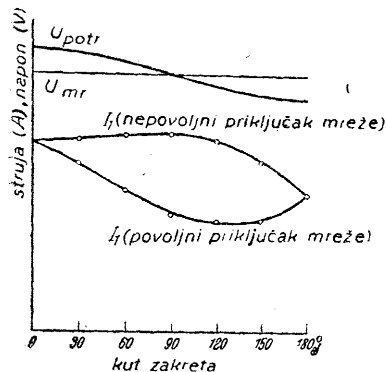
Statorski ili rotorski pojeni zakretni transformator treba u cilju smanjivanja predanog napona mehanički zakretati u onom smjeru, u kojemu bi se pokušao okretati rotor, kad bismo sekundarni namot pokusno isklopili i kratko spojili.

Kod pokusa praznog hoda opisano je dalje, kako možemo na jednostavan način odrediti pravi smjer zakretanja. Držimo li se ovih pravila, dobit ćemo u primarnom namotu znatno manju struju I_1 nego u drugom slučaju. To vrijedi za slučaj, koji najčešće imamo, kada energija teče od U_{mr} prema U_{potr}, i uz cosφ potrošača veći od 0,0. Razloge možemo razabrati iz dalje opisana dijagrama.

Dijagram. Sl. 78 prikazuje dijagram opterećenog zakretnog transformatora, uz zanemarenje padova napona. $\mathfrak{U}_{potr_f} = \mathfrak{U}_{mr_f} + \mathfrak{U}_{2f}$ je fazni napon potrošača. $\mathfrak{I}_{potr}$ je istovremeno struja potrošača i struja u sekundarnom namotu. $\mathfrak{U}_{mr}$ je napon primarne mreže, reduciran na fazu zvijezde, a $\mathfrak{I}_{mr}$ je mrežna struja. Struja u primarnom namotu zakretnog transformatora je $\mathfrak{I}_1$. Sastoji se od dva dijela, struje magnetiziranja $\mathfrak{I}_{10}$ koju uzima u praznom hodu i struje $\mathfrak{I}_{potr} = \mathfrak{I}_{potr} \cdot \epsilon^{-aj} \cdot \mathfrak{U}_{2oj}/\mathfrak{U}_{m_{rf}}$, koja drži ravnotežu struji potrošača $\mathfrak{I}_{potr}$. Fazni položaj struje $\mathfrak{I}_{potr}$ zavisi o faznom kutu potrošača φ_{potr} i o kutu zakreta α transformatora. Konstrukcija dijagrama kod zakreta za kut α u smjeru ili nasuprot smjeru okretnog polja proizlazi iz slike. Razabiramo, kako se oba dijela primarne struje $\mathfrak{I}_1$, t. j. $\mathfrak{I}_{10}$ i $\mathfrak{I}_{potr}$ sastavljaju u oba slučaja u dvije sasvim različite ukupne struje $\mathfrak{I}_1$. U uzbudnom namotu zakretnog transformatora dobivamo veliku ili malu struju. Ugrijavanje mu je proporcionalno s gubicima, dakle s kvadratom struje I_1. Uz struju magnetiziranja od cca 30% može nastati u krajnjem slučaju razlika u struji I_1 u omjeru 1,3 : 0,7, dakle u gubicima 1,69 : 0,49 ili 3,45 : 1. Fizikalni je razlog taj, što kod »pravog« zakreta sekundarnog napona za kut α od nul-položaja u smjeru okretnog polja, struja $\mathfrak{I}_{potr}$ sadrži komponentu, koja prema naponu $\mathfrak{U}_{2f}$ za 90° fazno prethodi, te svojim magnetizirajućim djelovanjem primarni uzbudni namot rasterećuje od jalove struje.

Na sl. 79 prikazane su mjerene krivulje, iz kojih vidimo, kako se struja I_1 unutar područja regulacije osjetljivo smanjuje kod ispravne regulacije.

Pokus praznog hoda. Prije no što počnemo mjerenjem magnetiziranja, moramo zakretni transformator udesiti. Prvo mjerimo fazni napon sekundarnog namota, koji još nije priključen, uz primarni namot uzbuđen nominalnim naponom U_{mr}. Iz rezultata odredimo prijenos $k_{21} = \sqrt{3} \cdot U_{2of}/U_{mr}$ Ako je ispravnost oznaka stezaljki izvan sumnje, spojimo sada sekundarni



Sl. 79. Struja I_1 mjerena u primarnom namotu trofaznog zakretnog transformatora spojenog na konstantni djelatni otpor kao potrošač, pri povoljnom i pri nepovoljnom priključku mreže.

namot s primarnim namotom prema podacima sheme spajanja. Tada potražimo položaj najmanjeg reguliranog napona $U_{potr_{min}}$, koji mora biti jednak $U_{mr} - \sqrt{3} \cdot U_{2of}$, te ga označimo sa (—). Položaj, u kojemu je napon U_{potr} točno jednak primarnom naponu U_{mr}, označimo (0). Napokon odredimo položaj najvećeg napona $U_{potr_{max}}$, koji označimo sa (+). Pripadni napon $U_{potr_{max}}$ jednak je $U_{mr} + \sqrt{3} \cdot U_{2of}$. Ako nije potrebno čitavo područje regulacije od $U_{potr_{max}}$ do $U_{potr_{min}}$, tada dolaze oznake (—) i (+) na odgovarajuća mjesta, bliže k (0). Kut između (0) i (+) nešto je veći od onog između (—) i (0), kao što se može vidjeti na dijagramu napona. Kako je dodavani napon $\sqrt{3} \cdot U_{2of}$ malen, nije lako razabrati maksimalnu i minimalnu vrijednost napona U_{potr}, napose zato, što minimum i maksimum teku vrlo položito. Ako nam je potrebna veća točnost, preporučuje se jednofazno mjerenje. Na primarnoj strani uzbudimo samo fazu UX, te zakrećemo transformator tako dugo, dok sekundarni naponi VY i WZ ne budu točno jednaki, dok će sekundarni napon UX biti dvostruko veći. Zatim zakrećemo za 180°el, dok oba napona ne budu opet jednako velika. Dobivamo oba tražena položaja s najvećom točnošću. Možemo također na primarnoj strani odvojiti samo stezaljku U od mreže, pa ćemo dobiti tražene položaje, kad sekundarni napon UX iščezne.

Ako su oznake sekundarnih stezaljki pogrešne, odredit ćemo ispravne na slijedeći način. Primarni namot priključimo na mrežu i odvojimo prvo stezaljku U. Zatim zakrećemo transformator, dok sekundarna faza označena sa UX ne pokaže napon nula. Tada spojimo primarno opet U, a odvo-

jimo V. Ne dirajući regulaciju, sada treba označiti sa VY onu sekundarnu fazu, koja ne pokazuje napon. Za kontrolu izvodimo još i treći pokus, gdje su primarno UV priključeni na mrežu, dok je W odvojeno. Sekundarna faza bez napona je WZ. Jesu li počeci i svršeci svake faze ispravno označeni, kaže nam daljnji pokus, kod kojega na sekundarnoj strani XYZ spojimo u zvjezdište i priključimo transformator primarno trofazno na mrežu. Linijski naponi na sekundarnoj strani moraju biti jednako veliki.

Možemo odrediti različite (0)-položaje, i to toliko položaja, koliko zakretni transformator ima polova. Odabiramo onaj, koji kod zakretanja regulacione naprave nadesno daje smanjivanje napona na izlaznoj strani. Dobivamo dakle kod »zatvaranja« regulatora manji napon kod potrošača (pipac za vodu!). No osim toga, kao što smo u početku zahtijevali, treba da zakrećemo sekundarni napon u smjeru okretnog polja. To ćemo postići odgovarajućim priključkom faza mreže. Da bismo to ustanovili, okrenemo zakretni transformator na (0) i opteretimo ga djelatnim otporom. Tada priključimo primarnu mrežu prvo redoslijedom RST, zatim redoslijedom TSR. Ispravan je onaj priključak, kod kojega struja I_1 u primarnom namotu pokazuje manju vrijednost. Kod pogrešnog priključka može doseći cca dvostruku vrijednost. Kod transformatora za vrlo velike prolazne snage, dakle sa vrlo malim dodatnim naponima U_{20f}, izvodimo ovaj pokus uz cca 1/10 nominalnog napona i isto tako cca 1/10 nominalne struje I_2. To daje snagu od samo 1/100 nominalne prolazne snage, no točnost time nipošto nije smanjena.

Treba li regulacionu napravu zakretati nalijevo, da bismo dobili smanjivanje napona, izvodimo pokus s okretnim poljem točno na isti način. Jasno je, da će biti bolji onaj redoslijed faza, kod kojega je primarna struja manja.

Često je zakretni transformator opremljen graničnim sklopkama, koje djeluju u položaju najvišeg i najnižeg napona. Pošto smo ih prostorno ispravno smjestili, najbolje ćemo ispitati njihovo funkcioniranje pokusnim žaruljama.

Pravi pokus praznog hoda predstavlja, kao kod svih asinhronih strojeva, snimanje karakteristika magnetiziranja. Ove dobivamo tako, da određujemo struju i snagu iz mreže u zavisnosti o priključenom naponu mreže.

Kako je raspor kod zakretnih transformatora većinom vrlo malen, to su ovi vrlo osjetljivi kod odstupanja na jednoj strani. Nejednak raspor očituje se više ili manje jakim brujanjem, a kod transformatora s namotima spojenim u seriju nejednakim sekundarnim naponima u tri faze. Brižnim udešavanjem i prizoniranjem, a osobito pak povećanjem raspora možemo ove pogreške praktički potpuno ukloniti. Povećanje jalove snage koju uzima sam transformator nije većinom ni od kakve važnosti, ako ga

promatramo kao dio prolazne snage. Povećanje primarne struje treba, naprotiv, unaprijed razmotriti.

Konačno označivanje stezaljki provedemo tako, da redoslijed *UVW* odgovara redoslijedu faza mreže *RST*, kako na ulaznoj, tako i na izlaznoj strani zakretnog transformatora.

Pokus kratkog spoja. Sekundarni namot zakretnog transformatora sam za sebe kratko spojimo, a na primarni namot priključimo mali napon. Rotor sada zakrećemo tako dugo, dok uz najmanji napon kratkog spoja na stezaljkama ne dobijemo najveću struju kratkog spoja. Struja kratkog spoja znatno koleba u zavisnosti o međusobnom položaju statora i rotora, jer o tome jako zavisi dvostruko ulančeni rasip. Određujemo međutim samo najmanju vrijednost prividnog otpora u kratkom spoju.

Prema propisima (RET) treba pokus izvesti pri pogonski toplom namotu ili ga preračunati na to stanje. Napon kratkog spoja izražavamo u postocima primarnog nominalnog napona i nazivamo ga nominalnim kratkospojnim naponom. On se odnosi na struju kratkog spoja, jednaku nominalnoj primarnoj struji. Dio $u_k \cdot \cos\varphi_k$ jednak je relativnom djelatnom naponu, a dio $u_k \cdot \sin\varphi$ rasipnom naponu. Ova tri napona označujemo sa u_k, u_r i u_s.

Primarna struja, koja bi tekla u kratkom spoju pri punom naponu, zove se struja kratkog spoja. Izražavamo je kao mnogokratnik nominalne struje, te je jednaka recipročnoj vrijednosti nominalnog kratkospojnog napona u. Vrijedi dakle:

$$\frac{\textbf{struja kratkog spoja}}{\textbf{nominalna primarna struja}} = \frac{1}{\textbf{nominalni kratkospojni napon}} .$$

Nastupi li pak kod zakretnog transformatora, koji radi u pogonskom štednom spoju, kratki spoj na sekundarnim stezaljkama, teći će u namotima znatno veće struje kratkog spoja. Kratko spojenim naponom ne smijemo sada više smatrati nominalni napon, već vrijednost povećanu u omjeru U_{notr_j}/U_{2_f}. Vrijede ista razmatranja i formule, kao što je izvedeno na str. 75 za normalni štedni transformator. Momentana vrijednost primarne struje kratkog spoja u namotu može kod nepovoljnog položaja zakretnog transformatora doseći vrijednost:

$$\text{struja udarnog kratkog spoja} = \text{struja kratkog spoja} \cdot 1{,}8 \cdot \sqrt{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{k_{21}}\right)$$

gdje je $$k_{21} = U_{2_{0f}} \cdot \sqrt{3}/U_{mr}.$$

Ova struja ne smije prekoračiti 50-struku vrijednost nominalne struje, s obzirom na ograničenu čvrstoću namota kod kratkog spoja. Ako nije dovoljan vlastiti prividni otpor kratkog spoja i dodatni otpor u izvoru

struje i dovodima, moramo se pobrinuti za potrebno ograničenje struje udarnog kratkog spoja prigušnicama spojenim pred transformator.

Gubitke kratkog spoja mjerimo točno kao kod transformatora, kad u kratko spojenom sekundarnom namotu teče nominalna struja. Odavle možemo odrediti dodatne gubitke, ako odbijemo čisto djelatne gubitke u namotu.

Promjena napona. Promjenu napona zakretnog transformatora možemo izračunavati po ovoj formuli:

$$u_\varphi = \frac{u_\varphi'}{a} + 0{,}5 \, \frac{u_\varphi''^2}{a^2},$$

gdje je

$$a = \frac{1}{k_{21}} \pm 1, \quad k_{21} = \frac{U_{2of} \cdot \sqrt{3}}{U_{mr}},$$

$$u_\varphi' = u_r \cdot \cos\varphi + u_s \cdot \sin\varphi,$$

$$u_\varphi'' = u_r \cdot \sin\varphi - u_s \cdot \cos\varphi,$$

$$u_r = u_k \cdot \cos\varphi_k, \quad u_s = u_k \, \sin\varphi_k.$$

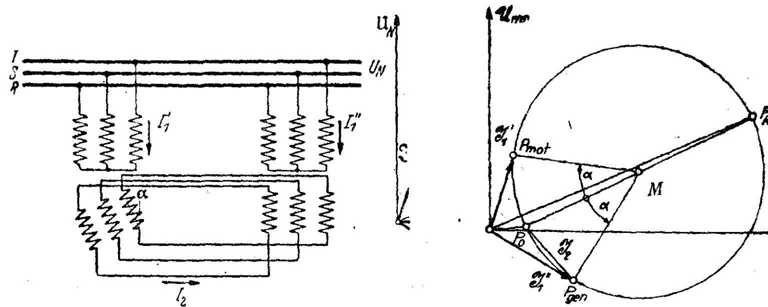
Pozitivan predznak odgovara položaju transformatora za najviši napon, a negativni predznak položaju za najniži napon na izlaznim stezaljkama. Promjenu napona zakretnog transformatora, kod kojega sekundarni namot radi odvojeno, možemo vrlo točno odrediti na isti način, kao što je opisan na str. 120 za pretvarač frekvencije. Za s treba uvrstiti 1,0, a za $\cos\varphi_2$ faktor snage potrošača.

Pokus opterećenja i trajnog rada. Kod zakretnih transformatora rijetko snimamo opterećenje. Pad napona kod opterećenja, izražen kao dio ukupnog napona, vrlo je malen i malo nas zanima, jer ga možemo regulacionom napravom odmah izregulirati. Kao opterećenje, osobito za pokus trajnog rada, dolaze u obzir ili normalni asinhroni motori ili drugi istovrsni zakretni transformator u spoju za povratni rad. U posljednjem slučaju najbolje je odvojiti sekundarni namot obaju transformatora od primarnog uzbudnog namota, i spojiti namote na primarnoj kao i na sekundarnoj strani međusobno paralelno. Sekundarne strane spojimo prvo jednopolno, te ih onda zakrećemo, sve dok voltmetar između još otvorenih stezaljki ne pokazuje više nikakovu razliku napona. Tada spojimo paralelno i preostale stezaljke. Zatim zakrećemo oprezno jedan od oba zakretna transformatora tako dugo, dok struja izjednačenja na sekundarnoj strani ne dosegne nominalnu vrijednost. Primarne struje se međusobno nešto razlikuju, no rezultate pokusa trajnog rada možemo lako preračunati na jedan ili drugi slučaj. Položaj struja naći ćemo, ako položimo kružnicu kroz točku praznog hoda P_0 i kratkog spoja P_k jednog transformatora, s promjerom jednakim udaljenosti P_0P_k. Nanesemo li u središtu ove kružnice M na P_0M isti kut zakreta α, dobivamo položaj obiju primarnih struja

$\mathcal{I}'_1$ i $\mathcal{I}''$ kao što možemo vidjeti sa sl. 80. Ovaj je dijagram identičan s onim za električku osovinu, kad miruje.

Kod trajnog rada treba uključiti stranu ventilaciju, koja je obično predviđena kod otvorenih zakretnih transformatora. Kod uljnih transformatora traje pokus zagrijavanja s nominalnom strujom vrlo dugo, pa se preporučuje, da se pokus znatno skrati na taj način, da ga započnemo s povećanom strujom.

Tokom pokusa opterećenja mogu zakretni transformatori, koji su u praznom hodu radili besprikorno, izvoditi jači ili slabiji magnetski šum, koji ukazuje na nesimetrije u rasporu ili u rasporedu namota. U takvu slučaju treba to onda kontrolirati.



Sl. 80. Opterećenje dvaju jednostrukih ili jednog dvostrukog zakretnog transformatora u povratnom radu. (P_0 i P_k su točke praznog hoda i kratkog spoja jednog transformatora. Električki kut zakreta α računamo od položaja, u kojemu je $\mathcal{I} = 0$.)

Zakretni moment. Zakretni transformator razvija kod opterećenja zakretni moment kojemu veličina i smjer zavise o faznom položaju struje prema naponu u namotima. S dijagrama na sl. 78. možemo uzeti fazni kut β između napona $\mathcal{U}_{2f}$ i struje $\mathcal{I}_{potr}$ u sekundarnom namotu. Zakretni moment djeluje kod oštrog kuta β u istom smislu, kod tupog kuta β u suprotnom smislu kao motorski moment kratkog spoja, koji djeluje kod kratko spojenog sekundarnog namota. Veličinu zakretnog momenta izračunavamo:

$$\text{zakretni moment u mkg} = \frac{\text{broj faza} \quad U_{2f} \cdot I_{potr} \cdot \cos\beta}{1{,}03 \quad n_{sin}},$$

pri čemu razumijevamo pod n_{sin} sinhronu brzinu vrtnje kod zamišljenog motorskog rada, t. j. $6000/2p$ kod $2p$-polnog transformatora na mreži s 50 Hz.

Kut β zavisi neposredno o $\cos\varphi$ potrošača. Kako ovaj nije od slučaja do slučaja poznat, izračunavamo maksimalno mogući zakretni moment kod 50 Hz:

$$\text{maksimalni zakretni moment u mkg} =$$

$$= \frac{\textbf{vlastita snaga zakretnog transformatora u kVA}}{\textbf{6,18}} \quad \text{broj polova}$$

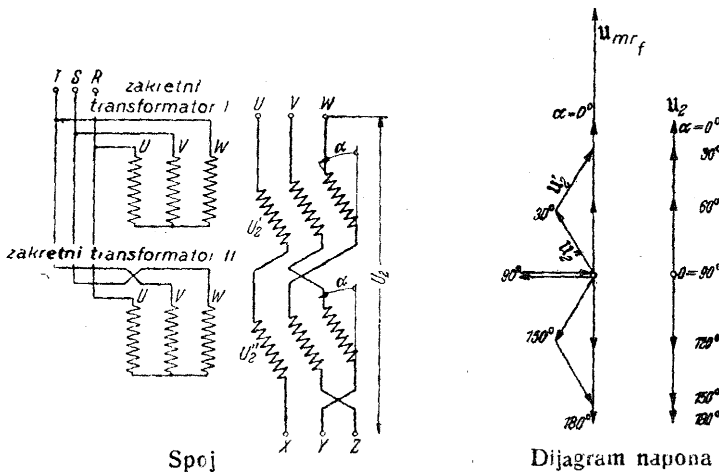
Kod dvostrukih zakretnih transformatora ukidaju se zakretni momenti u svim položajima kod djelatnog opterećenja. Kod jalovog opterećenja zbrajaju se u nul-položaju. Maksimalno mogući zakretni moment izračunavamo po istoj formuli, tako da umjesto vlastite snage jednog transformatora uvrstimo ukupnu vlastitu snagu dvostrukog transformatora.

Želimo li odrediti veličinu momenta regulacije, treba dodati 100 do 200% za momente trenja u ležajima i, prije svega, u pužnom pogonu, koji je obično predviđen. Moment regulacije izračunavamo dakle:

moment regulacije zakretnog transformatora u mkg =

$$= (2\ldots3) \cdot \frac{\text{vlastiti moment zakretnog transformatora}}{\text{mehanički prijenos}}.$$

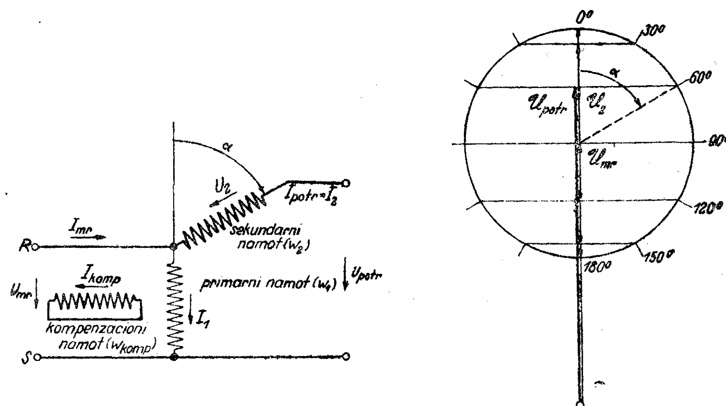
Moment na osovini za regulaciju možemo mjeriti s pomoću dvokrake udesive poluge sa zdjelicama za utege. Određujemo težinu, koja upravo dostaje da zakrene transformator u smislu većeg napona, kao i onu, koja upravo dostaje da proizvede zakret u suprotnom smislu. Obje sile, odnosno zakretni momenti, koji im odgovaraju, razlikuju se za dvostruki iznos neizbježivih sila trenja.



Sl. 81. Dvostruki zakretni transformator. Okretno polje rotira u oba transformatora u različitom smjeru. Zbog toga je potrebno zamijeniti faze na primarnoj i sekundarnoj strani jednog transformatora.

Jednostruki zakretni transformator opterećen djelatnim opterećenjem postavlja se pod utjecajem svog vlastitog momenta uvijek sam u (0)-položaj, koji smo gore odredili kao ispravan. On se sam odbija iz pogrešnog (0)-položaja, kojemu odgovara veća primarna struja I_1. Ako dakle transformator stoji u položaju (+), koji odgovara maksimalnom naponu potrošača, nastojat će da smanji svoj napon i obratno, u (—)-položaju će nastojati sam od sebe da ga poveća.

Dvostruki zakretni transformator. Dvostruki zakretni transformator sastoji se od dva jednako velika jednostruka transformatora, koji su kruto spojeni i primarno priključeni na istu mrežu. Okretna polja rotiraju u oba transformatora različitim smjerom. Sekundarni naponi, koji se fazno zakreću u dva različita smjera, spojeni su u seriju te daju prema dijagramu napona na sl. 81 ukupni sekundarni napon, koji se po veličini mijenja, dok po fazi ostaje isti. Ovaj možemo dovesti potrošaču sam ili kao dodatni napon primarnom naponu. Ispitivanje se neposredno nadovezuje na ispitivanje jednostrukih zakretnih transformatora. *Udešavanje* teče ovako: Najprije odredimo ispravni smjer okretnog polja, tako da izvedemo motorski pokus kratkog spoja na svakom transformatoru. Rotori moraju težiti da se zakrenu u dva različita smjera. U protivnom slučaju treba kod jednog transformatora zamijeniti dva dovoda mrežnog priključka. Zatim postavimo faze rotora u istu os s fazama statora, i to najbolje jednofaznom uzbudom na primarnoj strani, spojimo početke jednog sekundarnog namota sa svrše-



Spoj — Dijagram napona ($\mathfrak{U}_2$ i $\mathfrak{U}_{potr}$ za $\alpha = 60°$)

Sl. 82. Jednofazni zakretni transformator

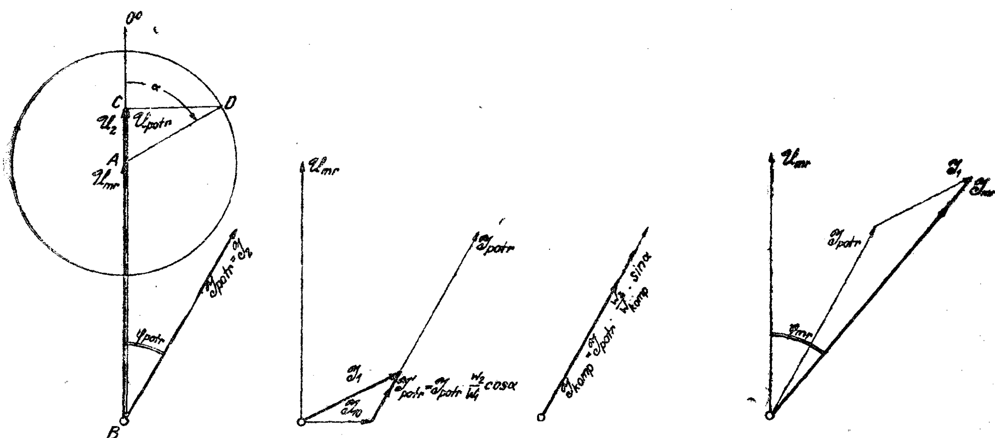
cima drugog sekundarnog namota, i spojimo krajeve prvoga u zvjezdište. Tri slobodna priključka treba da pokazuju dvostruki linijski napon. Zakretanjem rotora, koji su sada kruto spojeni, mijenja se taj napon do nule i raste kod daljnjeg zakretanja ponovno do maksimalne vrijednosti.

Upotrebljavamo li dvostruki zakretni transformator u štednom spoju, moramo sada zvjezdište ponovo otvoriti i spojiti te tri slobodne sekundarne stezaljke s primarnim stezaljkama mreže.

Primarna struja je u svakom slučaju različite veličine u oba transformatora, jer se dio, koji odgovara sekundarnoj struji, pribraja s različitim faznim položajem struji magnetiziranja.

Ako zanemarimo male padove napona, ostaje napon potrošača kod dvostrukog zakretnog transformatora u fazi s naponom mreže.

Jednofazni zakretni transformator. Kod jednofaznog zakretnog transformatora, koji radi s izmjeničnim poljem, zavisi veličina napona U_2, koji se inducira u sekundarnom namotu, o prostornom kutu zakreta prema primarnom namotu. Ona se mijenja s kosinusom ovoga kuta. Fazni položaj sekundarnog napona podudara se za kutove od 0 do 90° s onim primarnog napona; za veće kutove od 90 do 180° leži u protufazi s ovim (sl. 82). U 0°-položaju i u 180°-položaju podudaraju se međusobno magnetske osi primarnog i sekundarnog namota. Zbog toga može se razviti samo glavni tok, kad teče struja. U svim drugim položajima sekundarni namot, kroz koji teče struja, ima jednu magnetizirajuću komponentu u smjeru primarnog



Dijagram napona sa strujom potrošača $\mathcal{J}_{potr}$. Određivanje struje $\mathcal{J}_1$ u primarnom namotu. Određivanje struje $\mathcal{J}_{komp}$ u kompenzacionom namotu. Određivanje mrežne struje $\mathcal{J}_1$.

Sl. 83. Dijagram jednofaznog zakretnog transformatora.

namota i drugu okomito na ovaj. Ova posljednja teži da proizvede poprečni tók, koji bi izazvao vrlo veliki induktivni pad napona. Da bismo to otklonili, imamo još jedan uvijek u sebi kratko spojeni statorski namot. Ovaj se zove kompenzacioni namot. Struja u njemu zavisi o omjeru brojeva zavoja i o sinusu kuta zakreta. U primarnom namotu teče struja, koja se sastoji od struje magnetiziranja $\mathcal{J}_{10}$ i komponente $\mathcal{J}'_{potr}$ koja zavisi o sekundarnoj struji. Ova komponenta je proporcionalna kosinusu kuta zakreta, te zavisi naravno i o omjeru brojeva zavoja. Vrijede ove relacije:

$$\mathcal{J}'_{potr} = \mathcal{J}_{potr} \cdot \frac{w_2}{w_1} \cdot \cos\alpha,$$

$$\mathcal{J}_{komp} = \mathcal{J}_{potr} \cdot \frac{w_2}{w_{komp}} \cdot \sin\alpha,$$

pri čemu je $\mathcal{J}'_{potr}$ = komponenta primarne struje, koja potječe od struje $\mathcal{J}_2$, $\mathcal{J}_{komp}$ = struja u kompenzacionom namotu, α = kut zakreta, w_1, w_2 w_{komp} = broj zavoja triju namota, uzimajući u obzir pripadne namotne faktore.

Struje i napone vidimo u *dijagramu* na sl. 83. Padovi napona su pritom zanemareni. Razabiremo, da u primarnom namotu potpuno opterećena zakretnog transformatora u 90^0-položaju teče samo struja magnetiziranja, te da u 0^0-položaju odnosno 180^0-položaju u kompenzacionom namotu ne teče struja.

U praktičkoj izvedbi opremljen je stator često normalnim trofaznim namotom, od kojega dvije faze spojene u seriju predstavljaju primarni namot, a treća u sebi kratko spojena faza kompenzacioni namot. Rotor ima samo jedan namot, koji zauzima polovinu opsega.

Zakretni moment jednofaznog zakretnog transformatora pulzira s dvostrukom frekvencijom mreže. Transformator je vrlo sklon vibracijama, koje po mogućnosti ublažujemo prikladnim konstrukcionim mjerama, na pr. kočnicama s prigušnim djelovanjem.

Ispitivanje vršimo u praznom hodu i u kratkom spoju. Kod prvoga mjerimo i prijenos, tako da zakrećemo transformator, dok sekundarni napon U_{20} ne dosegne maksimalnu vrijednost. U kratkom spoju zakrećemo ga tako dugo, dok struja, koju uzima, ne dosegne maksimum. U 90^0-položaju uzima samo struju magnetiziranja.

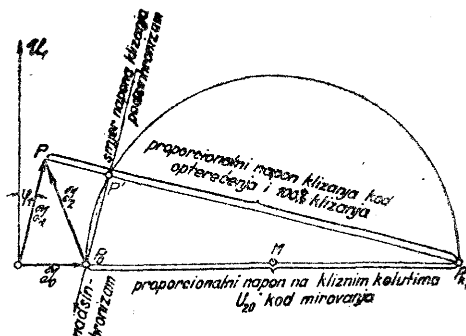
Kod ispitivanja trajnog rada postavimo transformator najbolje u srednji položaj, kod kojega teče struja kako u primarnom, tako i u kompenzacionom namotu. Temperaturu ovoga posljednjeg određujemo termometrom.

i) Asinhroni stroj s regulacijom brzine vrtnje i faze

Način rada. Brzinu vrtnje i jalovu snagu asinhronih strojeva, motora ili generatora, možemo regulirati naponom U_{rk} frekvencije klizanja i odgovarajućeg faznog položaja, koji dovodimo kliznim kolutima. Ovaj napon uzimamo iz višefaznih kolektorskih strojeva, koji rade kao pretvarači, motori ili generatori, izuzevši slučaj istosmjerne Krämerove kaskade, gdje napon daje jednoarmaturni pretvarač. Zajedno s ovim stražnjim strojem sačinjava asinhroni stroj t. zv. regulacioni agregat. Postoje različiti spojevi za ove agregate, no njihovo se djelovanje zasniva na principima, koje ćemo dalje razjasniti. *Brzinu vrtnje* asinhronog stroja možemo kod bilo kojeg opterećenja po volji regulirati prema dolje ili prema gore na taj način, da kliznim kolutima izvana dovedemo sekundarni napon frekvencije klizanja, koji je točno u fazi ili u protufazi s naponom klizanja. Fazni položaj napona klizanja mijenja se nešto s opterećenjem. Zbog toga sekundarni napon regulacije U_{reg}, koji smo doveli u svrhu regulacije brzine vrtnje, djeluje samo kod jednog posve određenog opterećenja isključivo u smislu regulacije brzine. Kod svih pak ostalih opterećenja utječe i na fazni položaj

struje. Ako je regulacioni napon u fazi s naponom klizanja, smanjivat će brzinu vrtnje, a ako je u protufazi, povećavat će brzinu vrtnje.

Jalovu snagu asinhronog stroja možemo mijenjati kod bilo kojeg opterećenja kompenzacionim naponom U_{komp} frekvencije klizanja, koji izvana dovodimo kliznim kolutima. Ovaj mora stajati okomito prema naponu klizanja, te popravlja fazu, ako *zaostaje* za ovim, a kvari je, ako je *pred* njim. Zbog promjenljivog položaja napona klizanja kod promjena opterećenja djeluje kompenzacioni napon samo kod jednog posve određenog opterećenja isključivo na fazni pomak, dok kod drugih opterećenja utječe i na brzinu vrtnje asinhronog stroja.



Sl. 84. Određivanje veličine i smjera napona klizanja kod većih asinhronih strojeva. Napon klizanja $= \frac{\text{klizanje } \%}{100} \cdot$ napon mirovanja $\frac{PP_{kl}}{P_0 P_{kl}}$.

Fazni položaj napona klizanja dobivamo kod većih strojeva, kod kojih možemo zanemariti gubitke u bakru statora, a koji praktički dolaze u obzir za regulacione agregate, prema sl. 84. Bilo koju točku opterećenja P, koja ne mora ležati na Heylandovoj kružnici, spojimo s točkom P_{kl}. Ova spojnica siječe Heylandovu kružnicu, koja prolazi normalnom točkom praznog hoda P_0 i točkom idealne struje kratkog spoja P_{kl}, a kojoj je središte na nul-liniji, u točki P'. Pravac P_0P' daje smjer napona klizanja. Ovaj gleda prema gore za podsinhronu brzinu vrtnje, a prema dolje za nadsinhronu brzinu. Veličina napona klizanja zavisi o veličini klizanja s % i o faznom položaju točke opterećenja P', te je jednaka:

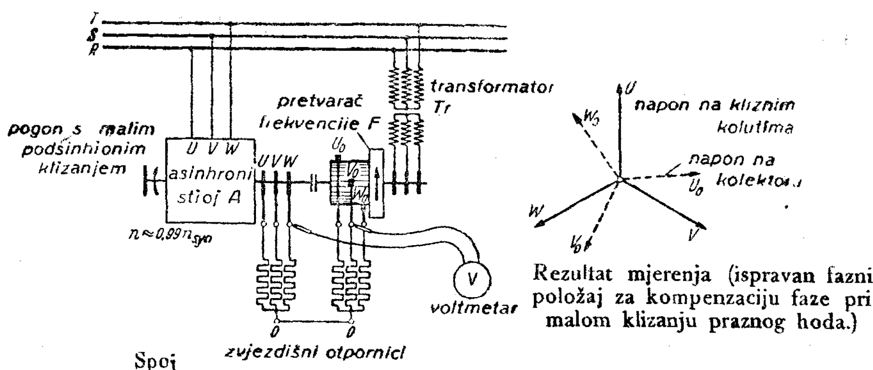
$$\text{napon klizanja u V} = \frac{\text{klizanje u } \%}{100} \cdot \text{napon mirovanja rotora} \cdot \frac{PP_{kl}}{P_0 P_{kl}}.$$

Kod toga smo zanemarili primarni otpor, što ne uzrokuje nikakvu zamjetljivu pogrešku.

Regulacioni agregat ispitujemo tek pošto smo iscrpno ispitali pojedine strojeve, dakle sam glavni asinhroni motor i kolektorske strojeve, opisane na str. 309—317. Prije puštanja agregata u rad najvažnija je mjera, da točno odredimo fazni položaj napona u sekundarnom krugu, što ćemo opisati.

Mjerenje ćemo prikazati na primjeru asinhronog stroja, koji je pojen sa sekundarne strane preko pretvarača frekvencije po smjernicama, koje možemo bez daljnjega prenijeti na drugačije uređaje. Spoj je prikazan na

sl. 85. Ista mreža poji asinhroni stroj *A* neposredno, a pretvarač frekvencije *F*, koji je s njim kruto spojen, preko transformatora *Tr*, koji smanjuje napon. Klizni koluti stroja *A* spojeni su sa četkicama na kolektoru stroja *F*. Pokus počinje mjerenjem frekvencije, koja se pojavljuje na četkicama kolektora, kad pretvarač frekvencije ide. Sekundarni krugovi su isprva naravno još otvoreni. Na četkice priključimo voltmetar sa zakretnim svitkom i promatramo kazaljku. Ako se ova polagano njiše amo tamo, imamo traženu frekvenciju klizanja. Ako pak ostane stajati na 0, te kod toga sama vrlo brzo treperi, to je znak, da je frekvencija vrlo visoka, t. j. da je redoslijed faza na strani kliznih koluta pretvarača obrnut. To ispravljamo zamjenom dvaju dovoda na primarnoj strani transformatora *Tr* ili na strani



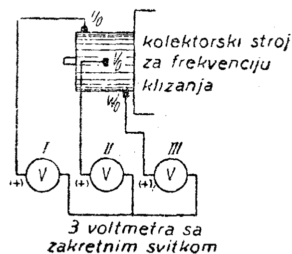
Rezultat mjerenja (ispravan fazni položaj za kompenzaciju faze pri malom klizanju praznog hoda.)

Sl. 85. Mjerenje napona po veličini i fazi s pomoću dvaju zvjezdišnih otpornika. (Spojevi između oba stroja ostaju kod toga otvoreni.)

kliznih koluta pretvarača. U slijedećem pokusu ispitujemo redoslijed faza napona klizanja i napona pretvarača frekvencije. Sa tri voltmetra za istosmjerni napon (instrumenti sa zakretnim svitkom) odredimo prema sl. 86 vremenski redoslijed napona klizanja, koji se pojavljuju na kliznim kolutima asinhronog stroja, koji polako kliže. Brzina vrtnje asinhronog stroja mora kod toga biti nešto manja od sinhrone, jer se kod nadsinhrone brzine redoslijed faza napona klizanja obrne. To ćemo postići velikim regulacionim otporima u krugu armature stroja, koji radi neopterećen, ili tako, da ga gonimo pomoćnim strojem, pri čemu klizni koluti ostaju otvoreni. Tri voltmetra daju otklone jedan za drugim u taktu frekvencije klizanja. Označimo instrumente prema redoslijedu otklona sa *I, II, III*, a klizne kolute, na koje su priključeni sa *U, V, W*. Uvjet je kod toga, da zvjezdište voltmetara sastavimo od stezaljki istog polariteta. (Upotrebljavamo li instrumente za izmjeničnu struju, dakle na pr. instrumente s pomičnim željezom ili elektrodinamske instrumente, dobit ćemo dvostruki broj otklona u jedinici vre-

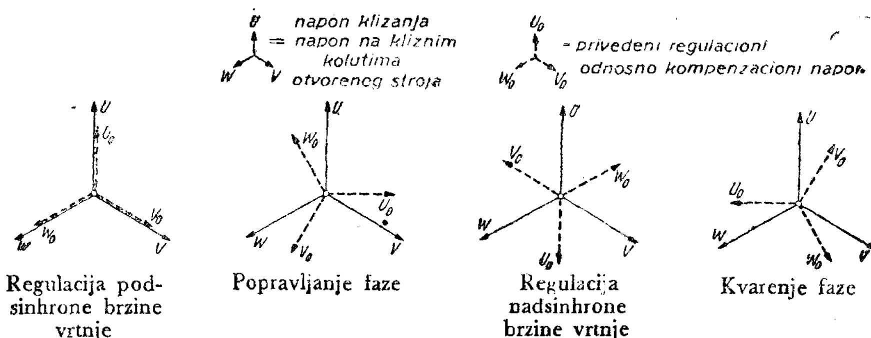
mena. Ako i opet označimo sa *I, II, III* redoslijed otklona, moramo pripadne kolute označiti sa *U, W, V,* dakle obrnutim redoslijedom faza no prije.)

Isto određivanje redoslijeda faza primjenjujemo kod četkica na kolektoru pretvarača frekvencije. Ako je ovaj pogrešan, smijemo ga korigirati jedino odgovarajućom promjenom oznaka na kolektorskoj strani, nipošto pak ne smijemo pokušati da možda primarno zamijenimo dvije faze. Posljedica bi toga bila, da bi se praktički pojavila dvostruka frekvencija mreže namjesto frekvencije klizanja. Primjećujemo, uostalom, da redoslijed faza kod svih rotorski pojenih kolektorskih strojeva odgovara suprotnom smjeru vrtnje armature. Od četkice U_0 doći ćemo dakle do četkice V_0, ako idemo nasuprot smjeru vrtnje kolektora, a odavde u istom smjeru do četkice W_0. Kod statorski pojenih kolektorskih strojeva zavisi redoslijed faza na kolektorskoj strani samo o redoslijedu faza uzbudnog napona, a ne o smjeru vrtnje. Redoslijed faza trofaznih uzbudnih strojeva bez statora s vlastitom uzbudom podudara se naprotiv uvijek sa smjerom vrtnje.



Sl. 86. Određivanje redoslijeda faza kod frekvencije klizanja s pomoću triju voltmetara sa zakretnim svitkom. Vremenski redoslijed njihovih otklona pokazuje redoslijed faza na kolektoru (ili na kliznim kolutima). Treba paziti na brzinu vrtnje, jer je kod nadsinhronizma redoslijed faza obratan.

Nakon toga ispitujemo i ispravno prilagođujemo fazni položaj sekundarnog napona, dakle napona za regulaciju brzine vrtnje U_{reg} ili kompenzacionog napona U_{komp}, odnosno njihove sume, prema naponu klizanja asinhronog stroja. Za mjerenje je najbolje upotrebiti dva t. zv. zvjezdišna



Sl. 87. Potreban položaj zvijezda napona kod regulacije brzine vrtnje i faze asinhronih strojeva

otpornika, od kojih je jedan priključen, prema sl. 85, na tri klizna koluta, a drugi na tri četkice kolektora. Umjetno stvorena zvjezdišta međusobno spojimo. Sistematskim mjerenjem napona između tri klizna koluta *U, V, W* i tri četkice kolektora U_0, V_0, W_0 i zvjezdišta, odnosno međusobno, mo-

žemo jednoznačno odrediti položaj zvijezde napona klizanja asinhronog stroja i sekundarnog napona, koji mu privodimo. Najbolje je, da zvijezde nanesemo na papir. U prikazima na sl. 87 vidimo potrebni relativni položaj obiju zvijezda za pojedine slučajeve: regulaciju brzine vrtnje prema dolje, regulaciju brzine vrtnje prema gore, popravljanje faze i njeno kvarenje.

Općenito može tek slučajno fazni položaj napona klizanja i sekundarnog napona odmah u početku biti ispravan. U većini slučajeva treba ga tek udesiti. Položaj napona klizanja je nepromjenljiv, mogli bismo ga mijenjati jedino prostornim zakretanjem kućišta motora. To ne dolazi u obzir. Možemo se dakle prihvatiti jedino privedenog sekundarnog napona. Ovdje postoje dvije mogućnosti. Ili mijenjamo fazni položaj uzbudnog napona ili pak pomičemo nosač četkica. Prvo moramo primijeniti, kad kolektorski stroj ima komutacione zone ili kompenzacioni namot, jer u tom slučaju ne smijemo pomicati nosač četkica. Posljednje možemo učiniti kod svih strojeva bez statora. Kod rotorski pojenih strojeva imamo još jedno daljnje pomagalo, koje se sastoji u zakretanju jedne ploče spojke prema drugoj. Kod toga ostaju četkice u starom položaju, ali smo time zakrenuli momentanu os okretnog polja, zakrenuvši armaturu kolektorskog stroja zajedno s priključnim točkama kliznih koluta iz dotadašnjeg položaja. Kod statorski pojenih strojeva ne bi ova mjera imala svrhe. U slučaju, od kojega smo do sada polazili, gdje je stražnji stroj pretvarač frekvencije, služimo se, ukoliko stroj nema statora, pomicanjem četkica kao najjednostavnijim sredstvom. Zakretanje u smjeru vrtnje daje fazno prethođenje, a zakretanje nasuprot smjeru vrtnje fazno zaostajanje. U slučaju da je stroj opremljen statorom i kompenzacionim namotom, udešavamo spojku. Ako kod toga zakrećemo rotor u smjeru vrtnje, to odgovara zakretanju sekundarnog napona u smislu zaostajanja u fazi; obratno odgovara zakretanje nasuprot smjeru vrtnje prethođenju u fazi. Veza obiju ovih mjera postaje jasna, ako razmislimo, da zakretu nosača četkica u jednom smjeru odgovara očito zakret rotora u drugom smjeru, jer je važan relativni pomak jednog i drugog. Praktički postupamo tako, da prvo nacrtamo položaj i veličinu zvijezda napona, koje zahtijevamo, te zatim tako dugo zakrećemo četkice, spojku ili uzbudni napon, dok razlika napona jednako označenih kliznih koluta i četkica ne dosegne vrijednost, koju smo dobili sa slike. Mjerenjem daljnjih napona između nejednako označenih koluta i četkica utvrđujemo sigurno, da smo pomak faze izvršili u pravom smislu.

Napokon priključimo stražnji stroj na glavni asinhroni motor. Najbolje je, da mu reguliramo brzinu vrtnje što bliže do sinhronizma, a napon stražnjeg stroja smanjimo na nulu ili najmanju vrijednost. Tada možemo uz najmanju struju izjednačenja uklopiti. Kao približni oslonac možemo zapamtiti, da premošteni ostatak napona od svakih 1% izaziva struju izjednačenja od 100%.

Podignemo li zatim sekundarni napon na punu vrijednost, možemo prema brzini vrtnje i struji praznog hoda, koju asinhroni stroj uzima iz mreže, odmah još jedamput preispitati udešavanje. Kod čiste regulacije brzine vrtnje mora brzina vrtnje u praznom hodu iznositi:

$$n_0 = n_{sin} \cdot \left(1 \pm \frac{U_{sek}}{U_{20}}\right),$$

pri čemu vrijedi (+)-predznak za položaj u protufazi, a (—)-predznak za položaj u fazi napona U_{sek} i U_{20}.

Kod čiste regulacije faze brzina vrtnje u praznom hodu gotovo se ne mijenja. Struja praznog hoda iz mreže iznosi pak:

$$I_{0\,komp} = I_0 - \frac{U_{sek} - 3}{0{,}866 \cdot R_{kl}} \cdot \frac{U_{20}}{U_1},$$

pri čemu (—)-predznak pred drugim članom vrijedi za slučaj popravljanja faze, koji nas jedini praktički zanima. U slučaju kvarenja faze (smanjivanje napona kod popravljača faze!!) moramo ga zamijeniti (+)-predznakom. U obje jednadžbe znači, kao i prije, U_1 primarni napon mreže, U_{20} napon mirovanja rotora asinhronog motora između dva klizna koluta, U_{sek} sekundarni dovedeni napon između dvije četkice, R_{kl} otpor rotora asinhronog motora mjeren između dva klizna koluta i I_0 njegovu normalnu struju praznog hoda. Brojem 3 uzimamo u obzir pad napona u četkicama na kolutima i kolektoru, te u dovodu; ovaj iznosi $\sqrt{3} \cdot (0{,}3 + 1{,}0 + 0{,}4)$.

Najjednostavnija metoda za kontrolu ispravna faznog položaja kompenzacionog napona sastoji se u tom, da promatramo napon mreže pred samo priključenje stražnjeg stroja i neposredno poslije toga. Ovaj će se nešto povisiti, ako je asinhroni stroj ispravno kompenziran.

Ispitivanje regulacionih agregata sastoji se u bitnosti u snimanju točaka opterećenja kod različitih vrijednosti regulacionog napona odnosno kompenzacionog napona. Većinom im je međutim snaga vrlo velika, ili ne raspolažemo uvijek sa svim pomoćnim strojevima. U ovim slučajevima omogućuje nam pojednostavnjen kružni dijagram, koji ćemo niže razjasniti, dobar pregled ponašanja stroja u radu.

Pojednostavnjeni dijagram reguliranog asinhronog stroja. Ovaj dijagram, prema sl. 88, vrijedi dovoljno točno za strojeve sa snagom iznad nekoliko stotina kilovata, kojima dovodimo regulacioni napon ili kompenzacioni napon praktički nezavisan o opeterećenju i o brzini vrtnje. Djelatni otpor sekundarnog izvora napona zanemarujemo, ili ga uzimamo u obzir tako, da ga pridodamo otporu R_{kl}. Padove napona na četkicama kliznih koluta i kolektora uvrštavamo u račun, kao gore, vrijednošću od 3 V. Otpor statora asinhronog stroja ne uzimamo u obzir. To izaziva tako malenu pogrešku, da je možemo dopustiti. Dijagram možemo nacrtati, ako poznajemo

slijedeće vrijednosti: struju praznog hoda I_0, idealnu struju kratkog spoja $I_{ki} = I_k/sin\varphi_k$ otpor između dva klizna koluta R_{ki}, napon mirovanja između dva klizna koluta U_{20}, te dovedeni sekundarni napon U_{sek} po veličini i fazi. S druge strane možemo ovaj posljednji odrediti s dijagrama, ako zahtijevamo kod određenog opterećenja određeni fazni položaj struje i brzinu vrtnje.

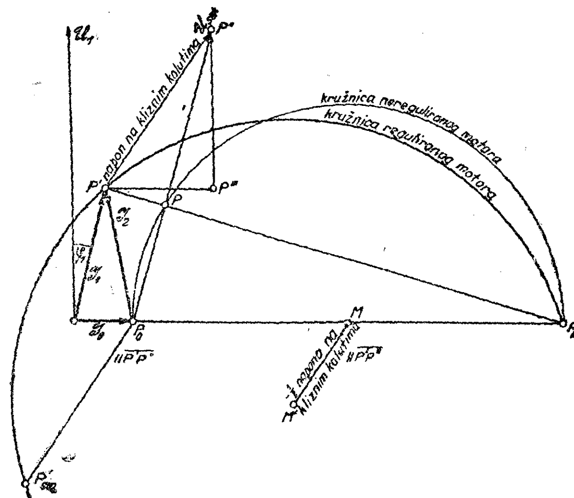
Kružnica kroz P_0 i P_{ki} sa središtem M na nul-liniji vrijedi za stroj bez regulacije. Središte M' regulirana motora dobivamo pomakom za dužinu MM', koja je jednaka:

$$\text{pomak središta } MM' = -\frac{1}{2}\left(\frac{\mathfrak{U}_{reg}}{m_{u_{sek}}} + \frac{\mathfrak{U}_{komp}}{m_{u_{sek}}}\right) = -\frac{1}{2}\,\mathfrak{U}_{sek}\,.$$

Kod toga je $m_{u_{sek}}$ mjerilo za sekundarni napon, koje računamo:

$$\text{mjerilo za sekundarni napon u V/mm } m_{u_{sek}} = 0{,}866 \cdot a_2 \cdot R_{ki} + \frac{3}{\overline{P_0P'}}.$$

P_0P' je dužina sekundarne struje kod punog opterećenja u mm, a a_2 mjerilo za sekundarnu struju, koje je jednako mjerilu za primarnu struju a_1 po-



Sl. 88. Kružni dijagram reguliranog asinhronog motora srednje veličine. ($\overline{P'P''}$ = napon na kliznim kolutima. $\overline{P'P'''}$ = kompenzacioni napon. $\overline{P'''P''}$ = regulacioni napon. $\overline{MM'} = -\frac{1}{2}\overline{P'P''}$. $\overline{P_0P'_{sin}}$ paralelno sa MM'. $\overline{P_0P'}$ = napon klizanja.)

množenu sa U_1/U_{20}. Središte M pomiče se dakle prema gore kod nadsinhrone regulacije brzine vrtnje; ono se pomiče prema dolje kod podsinhrone regulacije brzine vrtnje. Kad popravljamo cos φ mreže, ono se pomiče nalijevo, a nadesno se pomiče u rijetkim slučajevima, kad kvarimo fazu.

Sve kružnice prolaze točkom neizmjerno velikog klizanja, dakle točkom P_k na nul-liniji. Točku sinhronizma odredit ćemo jednostavno, ako kroz točku P_0 povučemo paralelu sa MM'. Ova siječe kružnicu u radnoj točki sinhrone brzine. Da bismo odredili klizanje za radnu točku P' na kružnici, položimo kroz P' paralelu sa MM', te je produžimo do sjecišta s pravcem napona klizanja P_0P. Konstrukciju ovog naveli smo gore i možemo je uzeti s dijagrama na sl. 88. Dobivamo točku P''. Klizanje iznosi:

$$\textbf{klizanje u točki } P' = s\,\% = 100 \cdot P_0P'' \cdot \frac{P_{k_i}P_0}{P_{k_i}P'} \cdot \frac{m_{u_{sek}}}{U_{20}}.$$

Za bilo koju drugu točku dobit ćemo klizanje tako, da povučemo bilo koju vertikalu, spojimo točku sinhronizma P'_{sin} i radnu točku P', koju smo upravo razmatrali, sa P_{k_i}, te podijelimo dio, koji odsijecaju ove linije na vertikali na s jednakih dijelova. Svaki od njih predstavlja onda 1% klizanja, a klizanje za bilo koju točku dobivamo tako, da je spojimo s P_{ki}, te očitamo vrijednost klizanja na vertikali.

Primarne i sekundarne struje možemo dobiti neposredno s dijagrama. Isto vrijedi za primarnu prividnu, jalovu i djelatnu snagu.

Ako je kod određenog opterećenja propisan $\cos\varphi$ i klizanje, a želimo odrediti regulacioni napon i kompenzacioni napon, postupak je slijedeći: Odredimo točku P', uzevši u obzir pretpostavljenu korisnost i zahtijevani faktor snage. Tada potražimo točku P'' na pravcu napona klizanja, uzevši:

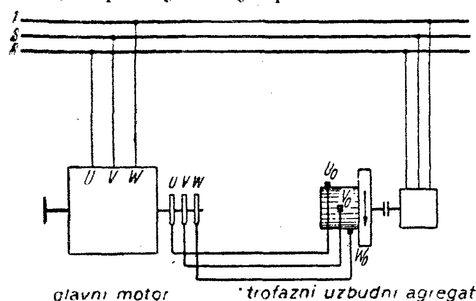
$$P_0P'' = \frac{s\,\%}{100} \cdot U_{20} \cdot \frac{P_{k_i}P'}{P_{k_i}P_0} \cdot \frac{1}{m_{u_{sek}}}.$$

Kroz P'' povučemo vertikalu, a kroz P' horizontalu. Ove se sijeku u točki P'''. Regulacioni napon jednak je $P'''P'' \cdot m_{u_{sek}}$, a kompenzacioni napon $P'''P' \cdot m_{u_{sek}}$.

Asinhroni motor s trofaznim uzbudnim strojem bez statora, s vlastitom uzbudom. Faktor snage velikih, polaganih asinhronih strojeva leži većinom ispod 0,8. Kako je prema tome potrebna velika jalova snaga, poželjno je, da popravimo $\cos\varphi$. Zato ovakve motore često opremamo trofaznim uzbudnim strojevima, o kojima ćemo pobliže govoriti na str. 309. Spoj pokazuje sl. 89. Glavni je motor priključen na mrežu, te je s rotorske strane spojen s četkicama, koje kližu po kolektoru uzbudnog stroja. Pogon ovoga preuzima mali pogonski motor, koji treba da pokrije samo njegove gubitke trenja. Kod ispravnog spoja kliznih koluta U, V, W sa četkicama U_0, V_0, W_0 daje uzbudni stroj napon, koji zaostaje za 90° za primljenom strujom, te koji djeluje na asinhroni motor u smislu popravljanja faze.

Na taj način kompenzirani asinhroni stroj ispitujemo prvo kao normalni motor, pri čemu izvodimo pokuse praznog hoda, kratkog spoja i opte-

rećenja, a zatim s uzbudnim strojem, pri čemu izvodimo samo mjerenja kod opterećenja. Daljnji pokusi, napose mjerenja u kratkom spoju i praznom hodu, otpadaju. Nije potrebno udešavati fazni položaj, nego je dovoljno



Sl. 89. Asinhroni motor s trofaznim uzbudnim strojem bez statora i s vlastitom uzbudom. (U generatorskom radu treba zamijeniti dva sekundarna priključka.)

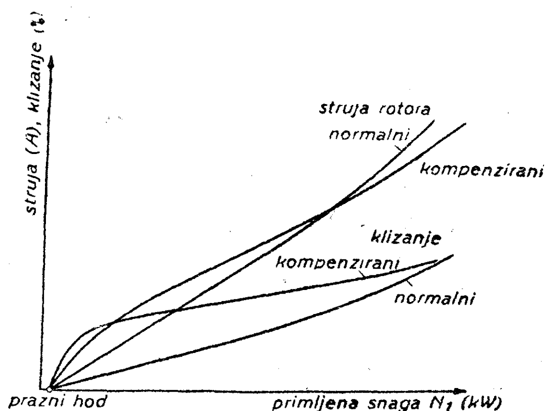
odrediti ispravan redoslijed faza na kliznim kolutima i četkicama na kolektoru. Redoslijed faza na kliznim kolutima možemo odrediti, kao što je navedeno na str. 148, trim voltmetrima sa zakretnim svitkom, dok motor polako kliže. Redoslijed faza uzbudnog stroja naprosto je jednak prostornom redoslijedu četkica u smjeru vrtnje kolektora. Označimo li bilo koju četkicu s U_0, to je slijedeća u smjeru vrtnje V_0, a iza nje W_0. Kako spoj četkica s priključnim stezaljkama nije teško slijediti, treba im oznake dobro preispitati i, ako je potrebno, korigirati.

Puštanje u rad možemo izvesti kako slijedi: Asinhroni stroj potjeramo, pokretač okrenemo u položaj kratkog spoja i zatim prespojimo klizne kolute na uzbudni stroj, koji ide. Kratko vrijeme, u kojemu smo kod toga sekundarni krug prekinuli, nema značenja čak ni onda, kad je stroj opterećen. Ispravan priključak uzbudnog stroja možemo odmah prepoznati po struji, koju uzima slabo ili potpuno opterećeni stroj, a koja se je, prema prijašnjoj, morala smanjiti. Ako je naprotiv porasla, moramo dva dovoda do uzbudnog stroja međusobno zamijeniti. Ukoliko kod toga nailazimo na poteškoće, možemo promijeniti smjer vrtnje uzbudnog stroja, ako njegove četkice nisu predviđene za rad u jednom određenom smjeru. Kako neispravni priključci na sekundarnoj strani ne dovode do štetnih posljedica, odustajemo često u ispitnoj stanici od točnog određivanja redoslijeda faza triju kliznih koluta, te provjeravamo ispravan ili neispravan zajednički rad jednim jedinim pokusom. Stezaljke, koje spadaju zajedno, treba naknadno točno označiti, pri čemu uzimamo oznake četkica na kolektoru kao mjerodavne.

Ako kompenzirani asinhroni motor treba da radi kao generator, moramo zamijeniti dva sekundarna dovoda, jer se u nadsinhronizmu redoslijed faza kliznih koluta obrne. U protivnom slučaju uzbudni bi stroj kvario fazu.

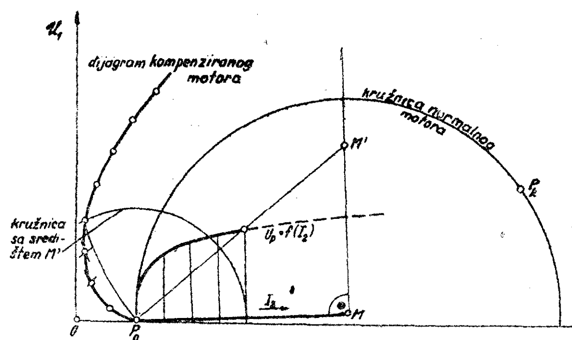
Rezultate pokusa opterećenja prikazujemo na uobičajeni način. Preporučuje se prikazati na zajedničkim dijagramima struje u statoru i rotoru, faktor snage, klizanje i korisnost za rad s uzbudnim strojem i bez njega, da bismo dobili neposredni, usporedni pregled za oba radna stanja. Sl. 90 pokazuje karakteristične krivulje struje armature i klizanja. Vidimo, da u

Korisnost određujemo, točno kao i kod običnog asinhronog motora, metodom pojedinačnih gubitaka. Napose izračunavamo sekundarne gubitke također iz klizanja i snage u rasporu. Ukupnim gubicima treba naravno pribrojiti snagu, koju uzima pogonski motor uzbudnog stroja. Jedino u slučaju da nismo mjerili klizanje, dakle ako nismo mogli izvesti mjerenja opterećenja, izračunavamo sekundarne gubitke iz gubitaka strujne topline u rotorskom namotu glavnog motora i uzbudnog stroja, gubitaka prijelaza na četkicama kliznih koluta i kolektora, i gubitaka u željezu uzbudnog stroja. Ukupni gubici prijelaza iznose kod punog opterećenja cca $5 \cdot I_2$ u vatima.



Sl. 90. Klizanje i struja u rotoru asinhronog motora normalnog, te kompenziranog uzbudnim strojem s vlastitom uzbudom.

Statorske struje kompenziranog asinhronog motora ne leže više na kružnici, već na krivulji višega reda, kako možemo razabrati s dijagrama na sl. 91. Ovu možemo točno odrediti, ako poznajemo struju praznog hoda



Sl. 91. Određivanje dijagrama asinhronog motora kompenziranog uzbudnim strojem s vlastitom uzbudom točku po točku s pomoću krivulje zasićenja $U_p = f(I_2)$ uzbudnog stroja.

I_0, struju kratkog spoja I_k, rotorski otpor asinhronog motora, koji bismo izmjerili između dva klizna koluta R_{kl}, te karakteristiku zasićenja uzbudnog stroja. Povećanjem otpora R_{kl} za 10% uzimamo u obzir otpor uzbudnog stroja, koji možemo, ako je poznat, i direktno pribrojiti k R_{kl}. Treba ga mjeriti također između dvije četkice. Ako nemamo karakteristike zasi-

ćenja uzbudnog stroja, nadomještamo je pravcem, koji prolazi točkom punog napona kod pune struje armature, a kroz 75% vrijednosti napona, kad ne teče struja. Ova nadomjesna karakteristika može nam dobro poslužiti do 20% struje.

Položimo struje I_0 i I , i dobijemo točke P_0 i P_k. Kroz središte normalne kružnice M povučemo okomicu na P_0M. Tada nanesemo iznad P_0M kao nul-linije karakteristiku zasićenja uzbudnog stroja. Kao apscise služe različite struje armature, koje nanosimo u mjerilu za sekundarnu struju $a_2 = a_1 \cdot U_1/U_{20}$. Ordinate su pripadni naponi, koje nanosimo u mjerilu za sekundarne napone $m_{usek} = 0{,}866 \cdot a_2 \cdot R_{kl} + \frac{3}{P_0P'}$. Kod toga je P_0P' približna dužina sekundarne nominalne struje u milimetrima.

Određivanje krivulje mjesta statorske struje točku po točku proizlazi odmah iz sl. 91. Klizanje ne možemo očitavati s nekog pravca klizanja, nego ga treba izračunavati točku po točku, i to:

$$\text{klizanje s } \% = 100 \cdot \frac{\text{ukupni sekundarni gubici}}{\text{predana snaga} + \text{ukupni sekundarni gubici}}.$$

Dijagram pruža dobar uvid u prilike, koje nastaju kod preopterećenja i kod malih opterećenja. Treba međutim držati na umu, da napon, koji daje uzbudni stroj kod vrijednosti klizanja iznad 4—5% opet silazi, ma da struja armature raste, jer se relativna brzina vodiča armature uzbudnog stroja prema okretnom polju smanjuje. Na sl. 91 uzeto je to u obzir time, što karakteristika zasićenja skreće. Između praznog hoda i punog opterećenja nije još potrebno računati s tom činjenicom.

Obrnutom konstrukcijom možemo za bilo koju točku P' naći potrebni napon uzbudnog stroja.

C. SINHRONI STROJEVI

Sastav. Sinhroni strojevi sastavljeni su od rotora, koji uzbuđujemo istosmjernom strujom, i armature, koja nosi jednofazni ili višefazni namot izmjenične struje. Polni sistem opremljen je kod četveropolnih i višepolnih strojeva većinom istaknutim polovima, dok dvopolni, a dijelom i vrlo veliki četveropolni generatori i motori imaju rotor u obliku bubnja. Ove posljednje nazivamo turbostrojevima. Uzbudni namot smješten je kod strojeva s istaknutim polovima kao koncentrični namot na polovima, kod turbostrojeva naprotiv porazdijeljen je i smješten u utorima. Izuzevši strojeve male snage, izvodimo uzbudnu stranu kao rotirajući dio stroja, koji obično rotira u unutrašnjosti armature. Tek rijetko izvodi se tako, da rotira izvana kad treba postići osobito velik zamašni moment (pogon Diesel-motorom). Polovi mogu biti masivni, te posve ili djelomično lamelirani. Stator, sastavljen od dinamo-limova, nosi u utorima namot armature. U polnim nastavcima

nalazi se često, ukoliko su izvedeni od limova, t. zv. prigušni namot. Ovaj je sastavljen od više štapova od bakra, mjedi, bronce ili željeza, koji prolaze u aksijalnom smjeru kroz polne nastavke, a na obje su strane kratkospojnim prstenima povezani u zajednički kratkospojni kavez. Kod masivnih polnih nastavaka nema štapova; kratkospojni prsteni oko polova predstavljaju nesavršeni, ali ipak zadovoljavajući kavez. Kratkospojni kavez od bakra treba da priguši njihanje, nastalo iz bilo kojeg razloga, no prije svega treba da poništi protuhodno polje kod jednofaznih ili nesimetrično opterećenih strojeva. Kavez izveden od materijala većeg otpora, omogućuje, da sinhroni stroj sam krene kao motor, pa i u slučaju znatnog protumomenta.

Ispitivanje sinhronog stroja je principijelno jednako za motor i za generator. Sastoji se u bitnosti od pokusa praznog hoda, kratkog spoja i opterećenja, te pokusa trajnog rada za određivanje ugrijanja. Kao nadopuna služe ispitivanja oblika krivulje napona, ispitivanja veličine struje i ponašanja stroja kod udarnog kratkog spoja, te zaleta kod motora, koji sami kreću. Ispitivanje možemo upotpuniti posebnim mjerenjima, kojima je svrha da pribavimo podatke i odredimo karakteristične veličine. Trajni rad velikih strojeva moramo većinom izvoditi sa sniženim naponom, a često i u kratkom spoju. Gubitke određujemo redovito pojedinačno u praznom hodu i kratkom spoju. Rjeđe ih mjerimo neposredno postupkom preuzbude, prema str. 42. Korisnost određujemo metodom pojedinačnih gubitaka. Jednofazne strojeve podvrgavamo istom ispitivanju kao i višefazne strojeve.

Pokus rasipa bez rotora. Kod većih sinhronih strojeva izvodimo prije ugradnje rotora t. zv. pokus rasipa, koji nam omogućuje da odredimo rasipni otpor statora, odnosno odgovarajući rasipni napon. To je ujedno prvo ispitivanje statorskog namota s obzirom na ispravnost spoja i broja zavoja. Kod ovog pokusa dovršeni stator priključimo na mali napon, koji tako dugo povećavamo, dok struja, koju stator uzima, ne dosegne vrijednost nominalne struje. Napon, koji smo morali primijeniti, dijeli se na iznos za pokrivanje rasipnog napona statorskog namota, dok preostatak napona služi za pokrivanje napona u provrtu, koji se inducira zbog polja u provrtu. Ovaj posljednji može se vrlo točno izračunati. Odbijemo li ga od ukupnog napona, dobit ćemo vrijednost traženog rasipnog napona statora. Formula za napon u povrtu glasi:

$$U_{provrt\ faze} = \frac{1}{6{,}63} \cdot \left(\frac{w \cdot f_{nam}}{100}\right)^2 \cdot \frac{f}{50} \cdot \frac{1}{2p} \cdot \left(l_{arm} - \frac{1}{2} l_{kv} + \frac{\tau_p}{6}\right) \cdot I_f,$$

gdje znači: w, f_{nam} broj zavoja i namotni faktor statorskog namota po fazi, f frekvenciju $2p$ broj polova, l_{rm} dužinu željeznog paketa, l_{kv}

sumu svih ventilacionih kanala, oboje u centimetrima, τ_p polni korak u centimetrima, I_f struju, koju stator uzima po fazi, i 6,63 = 125/6π.

Rasipni napon statora iznosi prema tome:

$$U_{s_{statora}} = U_{pokusa_{faze}} - U_{provrta_{faze}},$$

odakle možemo izračunati:

procentualni rasipni napon statora $u_{s_{statora}}\,\% = \frac{U_{s\,statora}}{U_{n_{faze}}} \cdot 100.$

Induktivni rasipni otpor iznosi:

$$X_{s\,statora} = U_{s\,statora}/I_n \quad \text{u omima.}$$

Procentualni rasipni napon statora leži otprilike u granicama od 7 do 20%.

Pokus praznog hoda. Pokus praznog hoda, koji izvodimo nakon mjerenja otpora namota armature i uzbudnog namota, možemo provesti generatorskim ili motorskim postupkom. Prednost dajemo generatorskom postupku. U tom slučaju spojimo sinhroni stroj s baždarenim istosmjernim strojem. Snaga ovoga mora dostajati, da pokrije gubitke.

Oba stroja potjeramo, te očitavamo vrijednosti praznog hoda kod rastućih vrijednosti uzbudne struje. Pritom izbjegavamo svako vraćanje uzbudnog regulatora, da bismo jednoznačno dobili točke s jedne grane krivulje. Uzbudnu struju najbolje je uzeti iz zasebne uzbudne mreže. Mjerimo: napon, uzbudnu struju i uzbudni napon sinhronog stroja, te brzinu vrtnje, napon i struju pogonskog motora. Rezultate prikazujemo u dva dijagrama. U jednome predočujemo napon u zavisnosti o uzbudnoj struji, u drugome gubitke u željezu i gubitke trenja u zavisnosti o naponu.

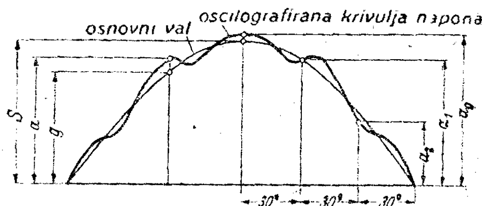
Motorski postupak ($\cos\varphi = 1{,}0$!) primjenjujemo većinom kod manjih strojeva. Mjerenje snage nije tako točno kao kod generatorskog postupka; napose odvajanje gubitaka trenja možemo provesti samo grafički metodom, koja je opisana na str. 15. No možemo izbjeći priključivanje pomoćnog stroja.

U mnogim slučajevima uz sinhroni prigrađen je uzbudni stroj, koji radi ili sa samouzbudom ili nezavisno uzbuđen preko pomoćnog uzbudnog stroja. Regulaciju uzbudne struje sinhronog stroja, koju smo prije često vršili velikim u seriju spojenim regulatorom polja, izvodimo finostepenim regulacionim otpornikom u uzbudnom krugu jednog od uzbudnih strojeva. Ispitivanje pravilne podjele na stepene ovog otpornika spada u ispitivanje stroja. Podjelu na stepene smatramo dobrom, ako možemo udesiti: prvo 80% nominalnog napona u praznom hodu, drugo 100% nominalnog napona u praznom hodu, kad je regulator zakrenut za cca 1/3, i treće punu uzbudnu struju kod regulatora zakrenutog za cca 2/3.

Brzim vraćanjem regulatora u krajnji položaj provjeravamo, da li je uzbudni stroj sklon, da se razbudi ili premagnetizira. Ova opasnost postoji, kad su četkice pomaknute iz neutralnog položaja.

Krivulja napona. Nizom prikladnih mjera kod projektiranja namota sinhronog stroja i kod formiranja, kosog postavljanja ili stepeničaste izvedbe polnih nastavaka, nastojimo, da bismo krivulji napona dali po mogućnosti sinusni oblik. U istom cilju dajemo redovito prednost spoju u zvijezdu, jer kod toga spoja treći harmonički sadržan u namotnom naponu otpada kod linijskog napona. Kod namota spojena u trokut, koji primjenjujemo kod motora s pokretanjem zvijezda—trokut, izbjegavamo treći harmonički skraćivanjem koraka za 60°.

Kontrolu faktične krivulje napona izvodimo oscilografskim snimanjem napona praznog hoda. Dobri mjerni transformatori ne izobličuju napon, te ih možemo bez bojazni upotrebiti za sniženje napona kod visokonaponskih strojeva. Snimamo namotni napon na stezaljkama. Prema propisima



Sl. 92. Ispitivanje praktički sinusnog oblika oscilografirane krivulje linijskog napona

(REM) smatramo krivulju napona praktički sinusnom, ako najveće odstupanje momentane vrijednosti *a* od istofazne vrijednosti *g* osnovne sinusoide ne iznosi više od 5% njezine maksimalne vrijednosti *S*. Ispitujemo samo napon na stezaljkama. Maksimalnu vrijednost izračunavamo prema prikazu na sl. 92:

$$S = \frac{a_0 + \sqrt{3} \cdot a_1 + a_2}{3},$$

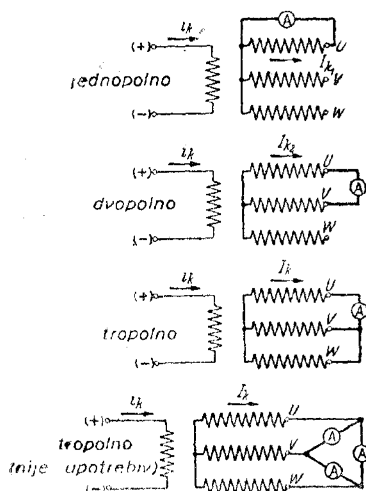
ukoliko su četvrtperiode međusobno simetrične. Većinom će to biti ispunjeno.

U slučaju da krivulja napona nije dosta dobra, možemo je gdjekada učiniti daleko boljom, ako na gotovu stroju promijenimo oblik polnog nastavka ili ako polne nastavke izvedemo stepeničasto ili koso. Na namotu možemo tek u vrlo rijetkim slučajevima nešto poduzeti. Povećanje uzbudne struje, koje redovito nastupa kao posljedica ovih promjena, treba procijeniti prije no što pristupimo njihovom provođenju.

Pokus kratkog spoja. Ovim pokusom snimamo karakteristiku kratkog spoja $I_k = f(i)$ i određujemo dodatne gubitke zavisne o opterećenju. Obično izvodimo kod trofaznih strojeva samo tropolni kratki spoj, rijetko kada ga upotpunjavamo pokusom dvopolnog i jednopolnog kratkog spoja. Odgovarajući spojevi prikazani su na sl. 93. Spojnice za tropolni kratki spoj spajamo u zvijezdu. Spoj u trokut ne smijemo primijeniti, jer bi se

struja, zbog nejednakosti otpora, koje uvijek postoje, mogla jako nesimetrično raspodijeliti. Kod jednofaznog pokusa u dvopolnom ili jednopolnom spoju, ukoliko nema prigušnog namota, inducirat će protuhodno polje u dijelovima namotâ, koji nisu kratko spojeni napone, koji svojom visinom mogu ugrožavati rukovaoce. Kod ovih ispitivanja moramo stoga smatrati stroj kao da je pod punim naponom. Uzbudnu struju možemo kod jednofaznih pokusa ispravno mjeriti samo instrumentom sa zakretnim svitkom, jer bi normalni instrument za izmjeničnu struju mjerio i izmjeničnu komponentu dvostruke frekvencije, koja se inducira u uzbudnom krugu. Kod strojeva spojenih u trokut mjerimo u kratkom spoju linijsku struju; namotnu struju dobivamo onda množenjem sa $1/\sqrt{3}$.

Karakteristiku kratkog spoja možemo odrediti i kod brzine vrtnje, koja manje ili više odstupa, jer je struja kratkog spoja I_k praktički nezavisna o brzini. Razlog je tome taj, što, kako inducirani napon, tako i induktivni otpor namota rastu linearno s frekvencijom. Samo kod sasvim male brzine vrtnje dobili bismo premale vrijednosti I_k, jer onda djelatni otpor sve više dolazi do izražaja.

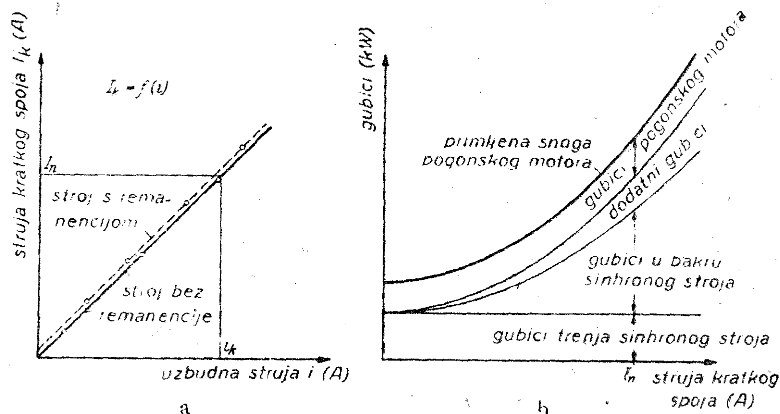


Sl. 93. Kratki spojevi sinhronog stroja. (Posljednji spoj nije upotrebiv, jer pokazivanje triju ampermetara zavisi o otporu spojnica.)

Gubici kratkog spoja sastoje se od gubitaka trenja, čistih gubitaka u bakru i *dodatnih gubitaka*. Uzbudne gubitke pokrivamo izvana, pa ih ne treba uzimati u obzir. Normalne gubitke u željezu kod pokusa kratkog spoja možemo zanemariti. Gubitke u željezu, koji faktično nastupaju, ubrajamo u dodatne gubitke, u koje osim toga spadaju i gubici zbog vrtložnih struja u namotu i bližim metalnim konstrukcionim dijelovima stroja, te gubici u prigušnim štapovima. Kod mjerenja dodatnih gubitaka moramo paziti, da brzina vrtnje bude točno nominalna, jer se dodatni gubici mijenjaju sa frekvencijom. Za vrijeme pokusa treba mjeriti temperaturu namota termometrom, ili još bolje mjerenjem otpora prije i nakon pokusa. Dodatni gubici su reda veličine 10 do 100% gubitaka u bakru, a ovi se mogu, zbog promjenljive temperature, kod istih struja promijeniti za cca 25 do 30%, dakle praktički za onoliko, koliko iznose gubici, koje želimo mjeriti. Ako nismo očitavali temperaturu, uzimamo kao osnovu srednju vrijednost hladnog i pogonski toplog namota.

Ukupne gubitke kratkog spoja pokriva priključeni istosmjerni stroj, kojemu su gubici poznati. Snimamo više točaka do nominalne struje ili nešto preko toga. Veza između struje kratkog spoja i uzbudne struje u tom je području linearna, tako da bi zapravo bilo dovoljno snimiti samo jednu točku. Zbog remanentnog magnetizma može se karakteristika kratkog spoja pomaknuti za mali iznos nalijevo ili nadesno. Kroz točke mjerenja položimo zato pravac, koji ne mora bezuvjetno prolaziti ishodištem.

Kod vrlo velikih strojeva ili kod takovih, kojima ne možemo priključiti pogonski stroj, a vlastiti uzbudni stroj ne dostaje da ih tjera, izvodimo pokus kratkog spoja kod *zaustavljanja*. Potjeramo sinhroni stroj povećavajući frekvenciju preko nominalne brzine vrtnje, odvojimo ga od mreže i prebacimo na kratki spoj. Ako je uzbuda prije bila uključena, moramo je najprije isključiti i onda ponovno udesiti, da bismo izbjegli udarni kratki spoj. Ova



Sl 94. Karakteristika kratkog spoja (a) i raspodjela ukupnih gubitaka kratkog spoja (b) sinhronog stroja.

zaustavljanja ponavljamo kod različitih struja kratkog spoja, te iz rezultata određujemo karakteristiku kratkog spoja i ukupne gubitke u kratkom spoju. Čiste gubitke trenja određujemo nakon toga još jednim zaustavljanjem kod uzbude nula. Gubitke prilikom prolaza kroz sinhronu brzinu vrtnje određujemo:

$$\text{gubici u kW} = \frac{(\text{zamašni moment u kg} \cdot \text{m}^2) \cdot (\text{nominalna brzina vrtnje})^2}{(\text{fiktivno trajanje zaustavljanja}) \cdot 365000}.$$

Pobliži podaci nalaze se na str. 37. Rezultati ovakvih mjerenja gubitaka kod zaustavljanja ponešto se razilaze. Zato je dobro da sve dobivene dodatne gubitke kvadratično preračunamo na nominalnu struju, da odredimo srednju vrijednost, i ovu ponovno reduciramo na pojedine vrijednosti struje.

Dodatne gubitke možemo odrediti i u praznom hodu sa preuzbuđenim ili poduzbuđenim strojem kao dio ukupnih gubitaka, prema podacima na str. 42.

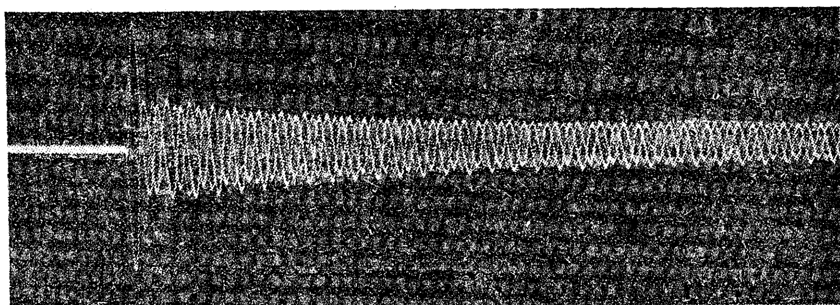
Karakteristiku kratkog spoja nanosimo u zavisnosti o uzbudnoj struji, a gubitke u zavisnosti o struji armature (sl. 94).

Pokus udarnog kratkog spoja. Svrha je ovog pokusa, da odredimo struju, koja će nastupiti kod iznenadna kratkog spoja na stezaljkama stroja, i da provjerimo mehaničku čvrstoću stroja, osobito namota, prema silama, koje kod toga nastupaju. Samo kućište opterećeno je velikim pulzirajućim zakretnim momentom udarnog kratkog spoja. Pokus izvodimo na slijedeći način: Sinhroni stroj potjeramo istosmjernim strojem ili asinhrono, nešto preko nominalne brzine vrtnje. Zatim stroj odvojimo od mreže, te ga uzbudimo. Kod prolaza kroz nominalnu brzinu vrtnje uklopimo sklopku, koja stezaljke potpuno kratko spaja. U tom času počinje udarni kratki spoj, koji nakon nekoliko sekunda prelazi u trajni kratki spoj. Brzina vrtnje smanjuje se za vrijeme pokusa, jer energija više ne pridolazi iz mreže, i to za vrijeme pravog udarnog kratkog spoja po periodičkoj funkciji. Uzrok je tome pulzirajući udarni moment, koji brzo iščezava, a koji naizmjence usporuje i onda opet ubrzava tromu zamašnu masu rotora.





a)



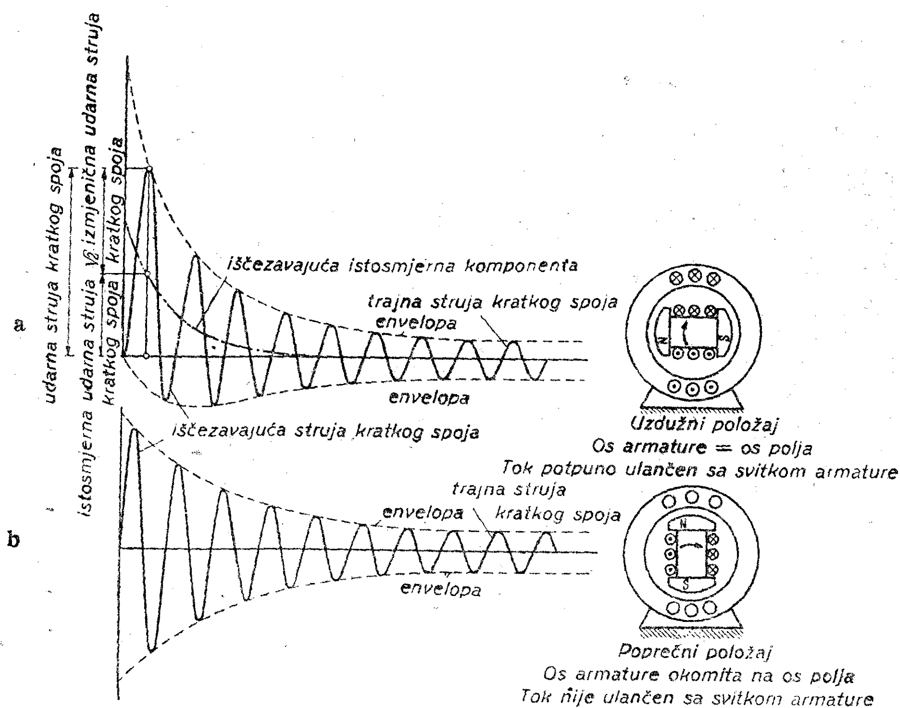
b)

Sl. 95 Oscilogrami udarnog kratkog spoja. (Pojedinačne snimke (a) i skupna snimka (b) triju faza).

Struje u tri faze armature snimamo oscilografski. Iz oscilograma reproduciranih u sl. 95 razabiramo, da se pravoj izmjeničnoj udarnoj struji kratkog spoja u različitim fazama superponira istosmjerna udarna struja kratkog spoja različite veličine. Ova je struja najveća u onoj fazi, kojoj je os, u času kratkog spoja, bila najbliže osi uzbudnog polja. Suma superponiranih struja je u svakom času jednaka nuli. (Ustvari i samoj istosmjernoj struji superponirana je izmjenična struja dvostruke frekvencije, no ova vrlo brzo iščezava i možemo je uvijek zanemariti). Strojevi s prigušnim namotom imaju sasvim u početku veću udarnu struju kratkog spoja, nego isti strojevi bez prigušnog namota. Ova letimična komponenta prelazi već nakon neko-

liko perioda u udarnu struju kratkog spoja, koja traje duže, a ova nakon više vremena u trajnu struju kratkog spoja. Zbog razlikovanja nazivat ćemo struju sasvim u početku letimičnom udarnom strujom kratkog spoja, kojoj slijedi udarna struja kratkog spoja.

Prema propisima (REM), koji ne uzimaju u obzir letimičnu komponentu udarne struje kratkog spoja, razlikujemo, kako se vidi na sl. 96, efektivnu vrijednost izmjenične udarne struje kratkog spoja, apsolutnu vrijednost udarne struje kratkog spoja, i efektivnu vrijednost trajne struje kratkog



Sl. 96. Udarni kratki spoj pri nepovoljnom (a) i pri povoljnom (b) položaju promatrane faze. U prvom slučaju puna, u drugom nikakva istosmjerna komponenta. (Razrada prema propisima (REM).)

spoja. Udarna struja kratkog spoja može doseći cca 1,8-struku tjemenu vrijednost izmjenične udarne struje kratkog spoja. Nadalje nazivamo omjerom udarnog kratkog spoja omjer izmjenične udarne struje kratkog spoja i nominalne struje, a recipročnu vrijednost nazivamo relativnim rasipnim naponom pri udarnom kratkom spoju.

Visinu zakretnog momenta udarnog kratkog spoja možemo doduše naći razradom krivulje zaustavljanja, ali nam treba prilično sredstava, da

bismo tu krivulju snimili. Zato odustajemo od mjerenja i izračunavamo ovaj udarni moment kao:

$$M_{ud} = \pm M_n \cdot \frac{I_{ud}}{I_n \cdot \cos\varphi},$$

gdje znači: M_n = nominalni zakretni moment,
I_n = nominalnu struju,
$\cos\varphi$ = nominalni faktor snage
I_{ud} = izmjeničnu udarnu struju kratkog spoja (efektivnu vrijednost).

Predznak (+) i (—) upozorava na pulzirajući karakter ovoga momenta. Proces titranja nastaje zbog pretvorbe energije polja u kinetičku energiju zamašnih masa, koje se gibaju.

Pokus zaleta. Kod svih sinhronih strojeva, koji sami kreću, u prvom redu dakle kod sinhronih motora za industrijske pogone svih vrsta, izvodimo pokus zaleta. Pritom snimamo oscilografski struju, napon i brzinu vrtnje na isti način, kao kod asinhronog motora. Možemo se stoga pozvati na str. 27 i 87. Sinhroni strojevi kreću pri punom naponu mreže ili napon smanjujemo transformatorom za pokretanje, odnosno prigušnicama spojenim u seriju. Osim toga upotrebljavamo pokretanje u spoju zvijezda-trokut, te t. zv. zalet s nepotpunim namotom. Prigušni kavezi preuzimaju za vrijeme zaleta funkciju, koju vrši kratko spojeni rotor kod asinhronog stroja. Često ih izvodimo kao jednostruke, a gdjekada i kao dvostruke kaveze. Uzbudni namot utječe općenito tek u drugom redu. On ne smije ostati otvoren, nego ga treba na prikladan način premostiti otporom 8 do 10 puta većim od vlastitog otpora, da bismo izbjegli visoke napone. Često uključujemo uzbudni stroj u ovaj strujni krug.

U prvom času, kad priključimo napon na stroj, koji miruje, dobivamo jednake prilike kao kod udarnog kratkog spoja. Zbog razmjerno velikog otpora kaveza za zalet, prvi šiljak struje, koji odgovara letimičnoj reaktanciji udarnog kratkog spoja, brzo nestaje. Inače je tok struje sličan kao kod asinhronog motora, samo se utjecaj međupolnih prostora i jednoosnog uzbudnog namota zapaža na oscilogramu struje po tipičnim cik-cak kolebanjima (sl. 14b). Krivulja zakretnog momenta većinom se ponešto razlikuje od one asinhronog motora, i to prekretno klizanje je općenito znatno veće. Prekretni moment dostižemo dakle prije. Kod cca 3 do 5% klizanja uspostavi se stalna brzina vrtnje, pri čemu je, naravno, klizanje proporcionalno s momentom opterećenja. Općenito preklopimo sada na normalni napon ili u normalni spoj. Brzina vrtnje još nešto poraste, a struja spadne nakon udarca kod preklapanja na nešto manju vrijednost. Sada uključimo istosmjernu uzbudu i kratko spojimo otpor za zaštitu kod

zaleta u uzbudnom krugu. Stroj sam od sebe upadne u korak. Uzbudu uključujemo u času, kada izmjenična struja frekvencije klizanja, koja se inducira u uzbudnom krugu, pokazuje upravo isti smjer kao uzbudna struja, koju priključujemo. Promatramo instrument sa zakretnim svitkom u uzbudnom krugu. U času, kad kazaljka pođe na desno, priključimo uzbudu. Sinhronizacioni moment, koji sada nastupa, zajedno s asinhronim momentom, koji još djeluje, ubrzava zamašne mase do pune brzine vrtnje. Potrebna uzbudna struja zavisi o veličini zamašnih masa, visini protumomenta uzrokovanog opterećenjem, i o iznosu klizanja kod nominalnog zakretnog momenta. U praktičkim slučajevima dostaje nominalna uzbuda uvijek za sinhronizaciju, ukoliko nominalno klizanje ne prelazi 5%.

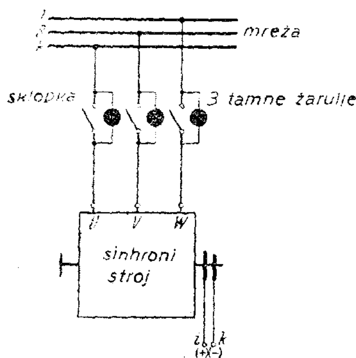
Promjenom otpora za zalet u uzbudnom krugu možemo u umjerenim granicama utjecati na visinu zaletnog momenta. Ako ga povećavamo, treba osobito paziti na povećanje napona, koji se pojavljuje u uzbudnom namotu, jer ovo može ozbiljno ugroziti izolaciju.

Snimanja opterećenja. Sinhroni stroj kao motor ili kao generator opterećujemo u nominalnom radu, dakle uz nominalni napon, struju, frekvenciju i faktor snage, ako je snaga uređaja ispitne stanice dovoljno velika. U tu svrhu spojimo stroj s istosmjernim strojem odgovarajuće veličine, te ga s pomoću ovoga potjeramo, sinhroniziramo i onda opterećujemo. Osim točke nominalnog opterećenja, snimamo još i daljnje točke opterećenja, koje nam daju karakteristične krivulje opterećenja sinhronog stroja. Nakon toga izvodimo pokus trajnog opterećenja, da bismo odredili ugrijanje.

Sinhronizacija. Pod sinhronizacijom razumijevamo priključivanje na mrežu sinhronog stroja, koji se okreće te je uzbuđen na napon mreže, i to tako, da bismo izbjegli svaki zamjetljivi udar struje. U tu svrhu treba da budu ispunjena tri uvjeta. Napon sinhronog stroja treba da je jednak onome mreže, frekvencija jednaka frekvenciji mreže, i fazni položaj napona jednak kao kod napona mreže. Posljednji uvjet uključuje ujedno i isti vremenski redoslijed faza napona. Za promatranje ovih uvjeta služe gdjekada posebno razvijene sprave za sinhronizaciju, no u ispitnoj stanici ih gotovo nikada ne primjenjujemo. Ovdje upotrebljavamo fazne žarulje u svijetlom ili u tamnom spoju, koje rade isto tako jednostavno kao i sigurno. Umjesto ovih možemo isto tako upotrebiti voltmetre.

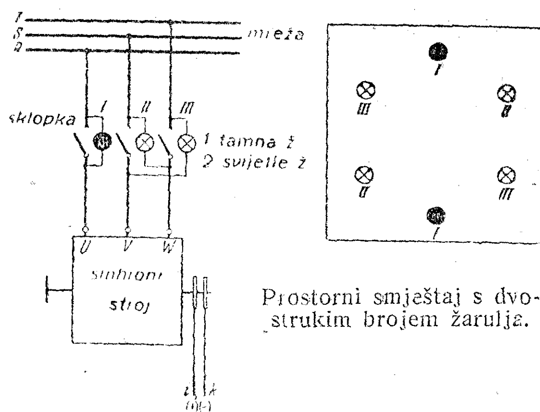
Tamni spoj. Sl. 97 prikazuje na primjeru stroja niskog napona tamni spoj, koji se najviše upotrebljava. Kod strojeva visokog napona priključujemo žarulje preko naponskog mjernog transformatora. Paralelno s tri mjesta prekida sklopke, priključena je po jedna žarulja, koja treba da je dimenzionirana za dvostruki fazni napon. Ako je nominalni napon ža-

rulje premalen, upotrebljavamo dvije ili više žarulja, spojenih u seriju. Djelovanje naprave je jednostavno. Čim se napon, frekvencija i fazni položaj sinhronog stroja i mreže podudaraju, bit će razlika potencijala na mjestima prekida još otvorene sklopke u svakom času jednaka nuli. Sklopku možemo uklopiti, a da ne poteče nikakva struja. Ispunjen je dakle uvjet potpune sinhronizacije. Tako dugo, dok frekvencije ne budu jednake, žarulje će se zajedno paliti u taktu razlike frekvencija.



Sl. 97. Tamni spoj za sinhronizaciju. (Kod potpune sinhronizacije sve 3 žarulje su ugašene. Ako se 1 žarulja ugasi, a obje druge svijetle, pogrešan je redoslijed faza na strani mreže ili generatora.)

Svijetli spoj. Prednost je ovog spoja, koji je prikazan na sl. 98, pred tamnim spojem, što možemo razabrati, da li sinhroni stroj, koji želimo priključiti, ide prebrzo ili prepolagano. Jedna je žarulja priključena između dvije iste faze, obje druge unakrst između dvije različite faze mreže i generatora. Kod sinhronizma prva će se žarulja dakle ugasiti, dok će obje ostale prilično jako svijetliti. »Tamna žarulja« treba da je posebno označena, jer samo ona smije ostati tamna, a ne koja od drugih dviju. Najbolje je da žarulje smjestimo na obodu kruga, pri čemu je zgodno da nasuprot svakoj postavimo još jednu jednako priključenu žarulju. Upotrebljavamo ih dakle ukupno šest. Tako dugo, dok se naponi doduše podudaraju, ali frekvencije još ne potpuno, opažamo, da sve žarulje redom potamnjuju, rasvjetljuju se i opet potamnjuju. Nastaje dojam kao da svijetlo rotira. Kad ovo stane, postigli smo jednakost frekvencija; kad se tamna žarulja ugasi, sinhronizacija je potpuna. Kod priključka prema sl. 98, svjetlosnom efektu, koji rotira nalijevo odgovara presporo okretanje generatora. Brzinu vrtnje treba dakle povećati. Rotira li svijetlo nadesno, brzina vrtnje generatora je previsoka, treba je sniziti.



Sl. 98. Svijetli spoj za sinhronizaciju. a) Slika koja stoji, pri čemu je žarulja I tamna = potpuna sinhronizacija. b) Svjetlosni efekt kruži nalijevo = sinhroni stroj ide prepolagano. c) Svjetlosni efekt kruži nadesno = sinhroni stroj ide prebrzo. d) Periodičko, odnosno trajno gašenje svih žarulja = pogrešni redoslijed faza na strani mreže ili generatora.

Prednost je tamnog spoja, što je mogućnost pogreške manja, te je ovaj osobito prikladan za upotrebu u ispitnim stanicama. Svijetli je spoj zgodan za stalne uređaje, te ga rado upotrebljavamo za stacionarne pretvarače u ispitnim stanicama.

Kontrola izvedenog svijetlog ili tamnog spoja. Ako već izvedeni spoj za sinhronizaciju nije sa sigurnošću poznat, ili možda sadrži pogreške, treba prvo izvesti pretpokus. To se uvijek preporučuje kod visokonaponskih uređaja, gdje preko naponskih transformatora može lako doći do pogrešnih spajanja. Generator odvojimo, a slobodne krajeve dovoda do sklopke izoliramo. Zatim uključimo mrežnu sklopku. Time nastaje za sinhronizacioni uređaj pogonsko stanje, koje odgovara potpunoj sinhronizaciji. Ako su žarulje tamne, imamo tamni spoj, ako dvije svijetle, a treća ostaje tamna, imamo svijetli spoj. Sada isključimo mrežnu sklopku i opet priključimo generator. Potjeramo ga, uzbudimo, i pažljivo promatramo ponašanje žarulja. Ako smo prije ustanovili tamni spoj, onda moraju sve tri istovremeno rasti i padati, i napokon se zajedno ugasiti. Ako smo naprotiv dobili svijetli spoj, mora nastati svijetlo, koje kruži, te će se napokon ugasiti ista žarulja kao i prije, a obje će druge jednako jako svijetliti.

Ukoliko smo kod pretpokusa imali tamni spoj, a kod rada daju žarulje rotirajuće svijetlo, onda je smjer okretanja generatora pogrešan ili je redoslijed faza mreže i generatora različit. Isto to vrijedi, ako umjesto očekivana svijetlog spoja dobijemo tamni spoj. U oba slučaja treba ili obrnuti smjer vrtnje generatora ili, ako je ovaj mehanički ispravan, zamijeniti dva dovoda mreže ili stroja. Kako kod toga može druga žarulja u svijetlom spoju postati »tamna žarulja«, ponovit ćemo zbog sigurnosti pretpokus. Pogrešni spoj kod sinhronizacije može izazvati zakretne momente četiri puta veće od udarnog momenta i ozbiljno ugroziti stroj.

Kod svih spojeva puni napon mreže dolazi preko žarulja, a može biti i preko upotrebljenih mjernih transformatora na stezaljke stroja, dok je mrežna sklopka još otvorena. Smijemo ih dakle doticati, makar stroj i stajao, samo ako su rastavljači pred sklopkom otvoreni ili žarulje izvađene.

Kod nemirne mreže ili pogona možemo gdjekada tek vrlo teško postići potpunu sinhronizaciju. U takvim slučajevima promatramo nekoliko njihaja, i malo prije no što će nastupiti pravi čas, uključimo sklopku. Kod toga je uvijek najbolje da generator ide nešto brže, jer u tom slučaju njegove zamašne mase ne treba ubrzavati do sinhrone brzine, nego ih zakočiti od nešto veće brzine do ove. Mreži dakle ne oduzimamo snagu, već je vraćamo.

Udešavanje opterećenja. Sinhroni stroj može raditi tako, da proizvodi ili troši djelatnu snagu, te da proizvodi ili troši jalovu snagu. On pretvara

samo djelatnu snagu, ako radi sa cos $\varphi = 1,0$, a samo jalovu snagu, ako je cos $\varphi = 0,0$. Općenito rade motori sa cos $\varphi = 1,0$, a generatori sa cos $\varphi = 0,7$ do $0,8$. Kad stroj radi na dovoljno velikoj mreži, možemo ova četiri radna stanja kao i međustanja po želji udesiti.

Ako pogonski stroj reguliramo prema manjoj brzini, uzimat će sinhroni stroj djelatnu struju iz mreže, dobivamo dakle motorski rad. Pogonski stroj postaje opterećenjem. Promatran s obzirom na mrežu izmjenične struje, sinhroni stroj djeluje kao djelatni otpor.

Reguliramo li pogonski stroj prema većoj brzini, davat će sinhroni stroj djelatnu struju u mrežu. Pogonski stroj smo opteretili. Promatran s obzirom na mrežu, djeluje sinhroni stroj u generatorskom radu kao negativni otpor.

Kad smanjimo uzbudnu struju sinhronog stroja, dakle u slučaju poduzbude, stroj će uzimati jalovu struju iz mreže. Na pogonski stroj ne će to utjecati. S obzirom na izmjeničnu mrežu, sinhroni stroj djeluje kao prigušnica, koja troši snagu za magnetiziranje.

Povećamo li uzbudnu struju sinhronog stroja, dakle u slučaju preuzbude, stroj će davati jalovu struju u mrežu. Na pogonski stroj ne će to utjecati. S obzirom na izmjeničnu mrežu, sinhroni stroj djeluje kao kondenzator.

Sinhroni strojevi rade obično s uzbudnom strujom, koja je veća od uzbudne struje u praznom hodu. Smatra se, da su preuzbuđeni onda, kad daju jalovu struju u mrežu. Kod opterećenih generatora to je redovit slučaj. Samo kad stroj radi na dugi vod kapacitivnog karaktera u praznom hodu ili kad radi kao popravljač faze, pa želimo sniziti napon mreže, smanjimo uzbudu i radimo sa poduzbudom. Faktor snage, koji odgovara faznom zaostajanju, susrećemo tek vrlo rijetko.

Praktički udešavamo puni ili djelomični teret na slijedeći način: Sinhroni stroj, koji smo spojili sa strojem ispitne stanice jednake snage potjeramo, uzbudimo, sinhroniziramo i priključimo na mrežu. U slučaju da ispitujemo *sinhroni motor*, povećat ćemo uzbudnu struju pogonskog stroja. Zbog toga će ovaj davati generatorsku struju u svoju mrežu, on će težiti da ide polakše i kočit će sinhroni stroj. Ovaj će zbog toga postati motor. Uzbudu istosmjernog stroja povećavamo tako dugo, dok vatmetri sinhronog motora ne pokažu snagu, koju ovaj treba da uzima. Sada udešavamo cos φ povećavanjem uzbudne struje sinhronog motora. Povećanjem za cca 30 do 50% iznad vrijednosti praznog hoda, dobivamo cos $\varphi = 1,0$, koji ćemo lako prepoznati po minimumu mrežne struje i po jednakom otklonu obaju vatmetara. Ako dalje povećavamo uzbudu, dobit ćemo preuzbuđeno stanje, u kojemu će stroj davati jalovu struju u mrežu. Kod sinhronih motora poželjno je to samo onda, kad treba kompenzirati susjedne potrošače jalove struje. Često puta sinhroni motori rade sa cos $\varphi = 1,0$. Kako ćemo

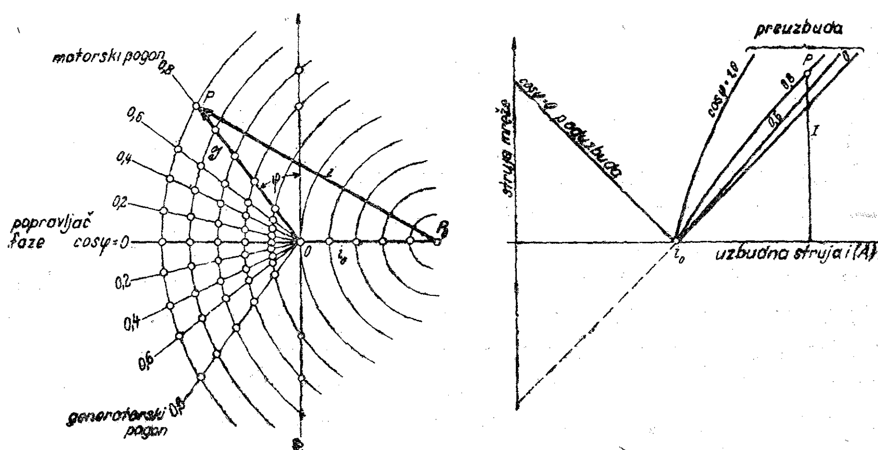
dalje vidjeti, zbog preuzbude znatno se povećava sinhroni prekretni moment, te je gdjekada zbog toga i primjenjujemo.

Kod ispitivanja *sinhronog generatora* oslabimo nakon sinhronizacije uzbudnu struju pogonskog stroja. Ovaj dakle teži da ide brže i zato jače tjera sinhroni stroj, koji postaje generator. Vatmetri pokazuju vrijednost djelatne snage, koju stroj daje. Daljnjim slabljenjem polja pogonskog motora možemo ga regulirati na traženu vrijednost, koja je jednaka prividnoj snazi puta faktor snage. Sada udešavamo sam faktor snage. I opet treba povećati uzbudnu struju sinhronog stroja. Da bismo postigli cos φ = 1,0 bit će potrebno manje povećanje uzbudne struje nego kod motora, jer se kod ovoga raspor izvodi obično veći. Većinom je faktor snage generatora 0,8 ili 0,7. Ove vrijednosti postizavamo uzbudnim strujama, koje su otprilike dva puta veće od uzbudne struje u praznom hodu. Zahtijevani faktor snage prepoznajemo po omjeru otklona vatmetara ili jednostavnije po vrijednosti pripadne mrežne struje, koju smo, što je najbolje, unaprijed izračunali iz prividne snage i napona mreže. Kod sinhronih strojeva, za koje ne možemo pribaviti pogonski stroj možemo izvesti samo pokuse s jalovim opterećenjem. Između motora i generatora nema razlike. Stroj uzima iz mreže neznatnu djelatnu snagu, kojom pokriva vlastite gubitke, radi dakle kao motor u praznom hodu. Kod preuzbude daje, a kod poduzbude uzima jalovu snagu. Na primjeru stroja u praznom hodu, koji se nalazi baš na samoj granici motorskog i generatorskog rada najbolje razabiramo, da nazivi kapacitivan kod preuzbuđenog motora i induktivan kod preuzbuđenog generatora, koji su nažalost uobičajeni, potječu samo od načina prikazivanja, koji zavodi u bludnju. Mali pogonski ili kočni moment može stroj pretvoriti u generator ili motor, a da ne utječe na davanje jalove struje.

Karakteristike opterećenja. Za praktično ponašanje sinhronog stroja najvažnije su karakteristike kod konstantnog napona na stezaljkama. Možemo ih snimati kod konstantnog faktora snage, kod konstantne djelatne snage i kod konstantne uzbudne struje. Ako smo izmjerili jedno od tih jata, možemo odatle lako odrediti druga. Kod generatora zanimaju nas prije svega karakteristike uz konstantni cos φ, kod motora uz konstantnu djelatnu snagu, ili ako ne reguliramo uzbudu, one uz konstantnu uzbudnu struju. Uvijek snimamo krivulju cos φ = 0, koja prikazuje uzimanje, odnosno davanje jalove struje u zavisnosti o uzbudi.

Karakteristike regulacije: $I = f(i)$. U = konst. cos φ = = 1,0, 0,8, ... 0,0 = konst. Kod snimanja ovih karakteristika, snimanih za niz faktora snage, koje uvijek držimo konstantnima, može stroj raditi kao motor ili kao generator. Samo kod malih strojeva dobivamo neznatnu razliku u uzbudnoj struji. Ravnamo se prema uređajima ispitne stanice. Na sl. 99a prikazane su kružnice za različite struje, na kojima su pravcima spo-

jene točke, koje pripadaju istoj krivulji regulacije. Vidimo, da sve linije za $I = 0$ moraju prolaziti kroz istu vrijednost uzbudne struje, naime kroz struju praznog hoda i_0. Praktički postupamo kod snimanja tako, da unaprijed izračunamo omjere otklona vatmetara, kojih se moramo pridržavati. Imamo na pr. za $\cos\varphi = 1{,}0$ $\alpha_1/\alpha_2 = 1{,}0$, za $\cos\varphi = 0{,}8$ $\alpha_1/\alpha_2 = 0{,}4$, $\cos\varphi = 0{,}6$ $\alpha_1/\alpha_2 = 0{,}13$ te napokon za $\cos\varphi = 0{,}0$ $\alpha_1/\alpha_2 = -1{,}0/+1{,}0$.



a) Pripadne vrijednosti J i i leže na zrakama kroz nul-točku.

b) Karakteristike regulacije $I = f(i)$ uz $\cos\varphi$ = konst. (Krivulje za motor i za generator približno su jednake.)

Sl. 99. Karakteristike regulacije $I = f(i)$ uz $\cos\varphi$ = konst. u vektorskom (a) i linijskom (b) dijagramu za idealni, nezasićeni stroj s cilindričkim rotorom, bez gubitaka.

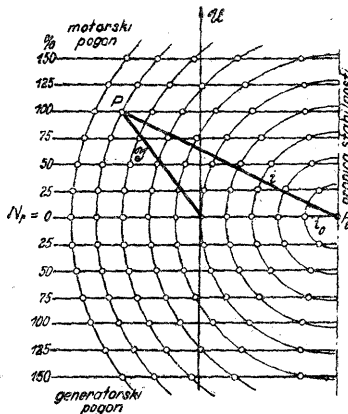
Daljnje pripadne vrijednosti možemo uzeti sa skale na str. 334. Postepeno povećavamo djelatnu snagu regulacijom uzbudne struje istosmjernog stroja, te korigiramo uzbudnu struju sinhronog stroja. Većinom nam dostaju krivulje za $\cos\varphi = 1{,}0$, $0{,}8$ i $0{,}0$. Ovu posljednju treba uvijek produžiti u područje poduzbude i snimiti do uzbudne struje nula. Uobičajeni način prikazivanja reproduciran je na sl. 99b.

V-krivulje: $I = f(i)$. U = konst. $N_r = {}^1/_4, {}^1/_2, {}^3/_4, {}^1/_1, {}^5/_4\ N_{rn}$ = konst. Ove karakteristike možemo vrlo lako snimiti. Udesimo sinhroni stroj na konstantnu djelatnu snagu te mijenjamo samo još uzbudnu struju. Sl. 100a pokazuje, da i ovdje možemo očekivati praktički jednake krivulje za motorski i generatorski rad. Točke jedne krivulje leže u strujnom dijagramu na paralelama s osnovnom linijom. Razabiramo, da se može kod pojedinih djelatnih snaga udesiti minimum mrežne struje udešavanjem jedne određene uzbudne struje. Ako odstupimo od ove uzbudne struje, povećat će se opet struja, i to zato što jalova struja teče u mrežu kod preuzbude, a iz mreže kod poduzbude. Uobičajeni prikaz reproduciran je na sl. 100b. Oblik krivulja pribavio im je naziv V-krivulje. Pojedine krivulje nemaju nijedne

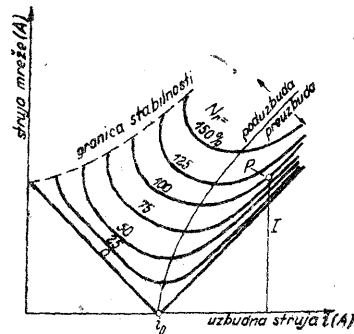
zajedničke točke. V-krivulja za $N_r = 0$ identična je s krivuljom za $\cos \varphi = 0$ kod karakteristika regulacije.

Unesemo li na pojedinim V-krivuljama točke za $\cos \varphi = 1{,}0$, $0{,}8$, $0{,}6$ itd. i spojimo međusobno jednako označene točke, dobivamo odmah karakteristike regulacije. Obrnuto, iz ovih možemo dobiti V-krivulje, ako nađemo točke iste djelatne snage, te ih spojimo.

K r i v u l j e   m j e s t a: I i $\cos \varphi = f(N_r)$. U = konst. $i_{uzb} = i_0$, i_{u_0}, i_r = konst. Krivulje mjesta daju nam neposredan uvid u ponašanje vektora struje kod promjena opterećenja. Uzbudnu struju držimo konstantnom,



a) Pripadne vrijednosti $\mathcal{I}$ i i leže na paralelama s nul-linijom.



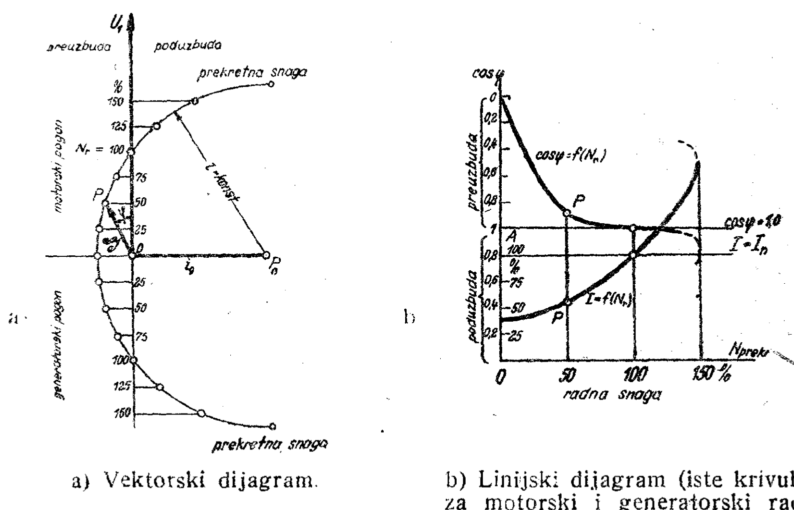
b) V-krivulje $I = f(i)$ uz N_r = konst. (Krivulje za motor i za generator su jednake.)

Sl. 100. V-krivulje $I = f(i)$ uz N_r = konst. u vektorskom (a) i u linijskom (b) dijagramu za idealni, nezasićeni stroj s cilindričkim rotorom, bez gubitaka.

pri čemu je najbolje da odaberemo uzbudnu struju u praznom hodu, vrijednost, koja odgovara polovici opterećenja, normalnu uzbudnu struju, i, sa stanovitim oprezom, uzbudnu struju nula. Sl. 101a prikazuje položaj točaka, koje prema tome leže na kružnim dijagramima sinhronog stroja. Naziv kružnice treba samo da podsjeti na kružnicu asinhronog motora, odnosno asinhronog generatora. U stvari krivulja mjesta je samo kod nezasićenog stroja s cilindričkim rotorom kružnica, dok je naprotiv kod stroja s istaknutim polovima Paskalova krivulja, koju, istina, u području nominalnog rada možemo vrlo dobro nadomjestiti kružnim lukom. Budući da potrebna uzbuda polova jako raste, bit će kružnice, kad stroj daje čisto jalovu struju, dakle kod djelatne snage nula, jako spljoštene. Obično se krivulje mjesta ne prikazuju vektorski, nego nanosimo, prema sl. 101b, struju i faktor snage u zavisnosti o djelatnoj snazi, koju stroj uzima, odnosno daje. Pojedine točke krivulja mjesta možemo bez daljnjega uzeti

sa karakteristika regulacije uz i_{uzb} = konst. Prema tome su sve tri vrste karakteristika određene, ako smo snimili samo jedno njihovo jato.

Određivanje uzbudne struje i promjene napona prema švedskim propisima. U praksi ispitnih stanica ovakvo je određivanje uzbudne struje uvedeno i pokazalo se dobrim. Potrebna nam je krivulja praznog hoda, uzbudna struja u praznom hodu, uzbudna struja u kratkom spoju i uzbudna struja za nominalnu struju pri cos φ = 0 i nominalnom naponu. Ove vrijednosti određujemo kod svakog ispitivanja. Sl. 102 pokazuje konstrukciju dijagrama za nominalnu struju. Na horizontalu nanesemo uzbudnu



a) Vektorski dijagram.

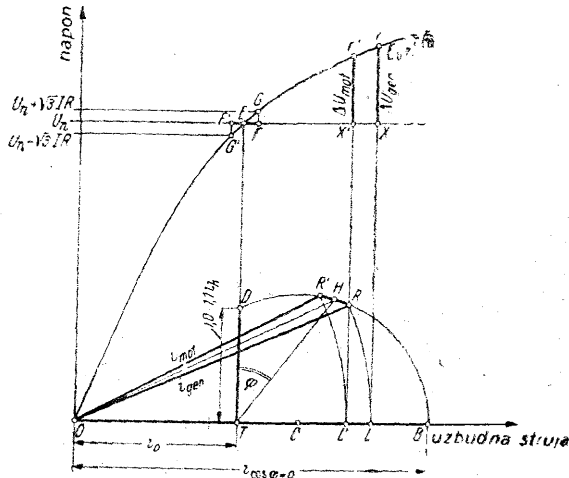
b) Linijski dijagram (iste krivulje za motorski i generatorski rad).

Sl. 101. Krivulje mjesta idealnog, nezasićenog sinhronog stroja bez gubitaka u vektorskom (a) i u linijskom (b) dijagramu.

struju u praznom hodu i uzbudnu struju za cosφ = 0. U krajnoj točki uzbudne struje praznog hoda *T* podignemo okomicu dužine jednake uzbudnoj struji kratkog spoja. Kod malih strojeva ispod 100 kVA povećamo ovu vrijednost za cca 10%, kod srednjih jedinica od nekoliko stotina kVA za 5%, a kod velikih za 0 do 2%. Kroz točku *D*, koju smo na taj način dobili, i točku *B* na horizontali položimo kružnicu sa središtem *C* na horizontali. Konstrukcija pokazuje, kako za bilo koji cos φ preuzbuđena stroja, motora ili generatora, možemo vrlo točno naći uzbudnu struju kao dužinu *OH*. Švedske norme uzimaju u obzir još i djelatni pad napona u namotu armature, zbog čega nastaje mala razlika u uzbudnoj struji motora i generatora. Na sl. 102 unesena je odgovarajuća konstrukcija, koju praktički ne upotrebljavamo, jer je pad napona neznatan. Nešto veću uzbudnu struju generatora i_{gen} dobivamo kao *OR*, nešto manju uzbudnu struju motora

kao OR'. Kružnice za $^3/_4$, $^1/_2$, $^1/_4$ struje dobivamo na isti način. Središta im nisu zajednička. Vertikalu TD linearno podijelimo, a na horizontalu nanosimo uzbudne struje, koje smo dobili sa $\cos\varphi = 0$ linije, dakle s V-krivulje za prazni hod. Središta kružnica pomiču se nalijevo, kad struje padaju, ali i za najmanje struje ostaju nešto nadesno od nožišta vertikale, t. j. krajnje točke T uzbudne struje u praznom hodu.

Pod *promjenom napona* razumijevamo razliku napona u praznom hodu, koji će se pojaviti kod rasterećenog sinhronog stroja bez naknadne regulacije i samog nominalnog napona, reduciranu na nominalni napon. Izražavamo je u postocima. U velikoj većini slučajeva uzbudna struja potpuno opterećena stroja veća je od uzbudne struje u praznom hodu. Pripadni napon praznog hoda leži dakle iznad nominalnog napona, i to utoliko više, što je slabije stroj zasićen. To vrijedi osobito kod manjih strojeva s obzirom na ograničeni prostor za uzbudni namot. Promjena napona kod ovih strojeva približava se zato jako gornjoj vrijednosti od 50% kod $\cos\varphi = 0,8$, koju određuju propisi (REM). Promjenu napona naći ćemo tako, da za nominalnu uzbudnu struju, koju dobivamo očitanjem kod opterećenja ili sa švedskog dijagrama, odredimo s karakteristike praznog hoda pripadnu vrijednost E_0 te izračunamo promjenu:



Sl. 102. „Švedski dijagram". Određivanje uzbudne struje kod motorskog ili generatorskog rada uz $\cos\varphi = 1,0$ ili uz preuzbuđen stroj prema švedskim normama. OEY = krivulja praznog hoda. $OT = i_0$ = uzbudna struja u praznom hodu. $TD = (1,0$ do $1,1)$ $i_k = (1,0$ do $1,1)$ · uzbudna struja u kratkom spoju. $OB = i_{\cos\varphi=0}$ = uzbudna struja kod struje I i $\cos\varphi = 0$. $HR = EF$; $HR' = EF'$. $OR = OL = i_{gen}$ = uzbudna struja generatora. $OR' = OL' = i_{mot}$ = uzbudna struja motora. YX = promjena napona generatora, $Y'X'$ = promjena napona motora. φ = kut faznog pomaka. Općenito daje OH praktički ispravnu uzbudnu struju motora i generatora, jer $\sqrt{3}\,IR$ možemo zanemariti.

$$\text{promjena napona u } \% = \frac{[(\text{napon praznog hoda kod nominalne uzbude}) - (\text{nominalni napon})] \cdot 100}{\text{nominalni napon}}$$

Ako je promjena napona kod gotovog stroja uz $\cos\varphi = 0,8$ veća od 50%, pomaže općenito samo smanjenje broja zavoja armature. Ovo se kadšto može provesti bez većih poteškoća izostavljanjem pojedinih zavoja. Stro-

jevi s prevelikom promjenom napona nemaju sami po sebi nikakvih osobitih mana pri radu.

Sl. 103. Određivanje uzbudne struje prema američkim normama ASA C 50-1936. (Kod djelomičnih opterećenja treba U_{pot}, $\sqrt{3}\,IR$ i i_k preračunati proporcionalno sa strujom I. Nacrtano generatorsko stanje isto je kao u sl. 102. Rezultat je isti.)

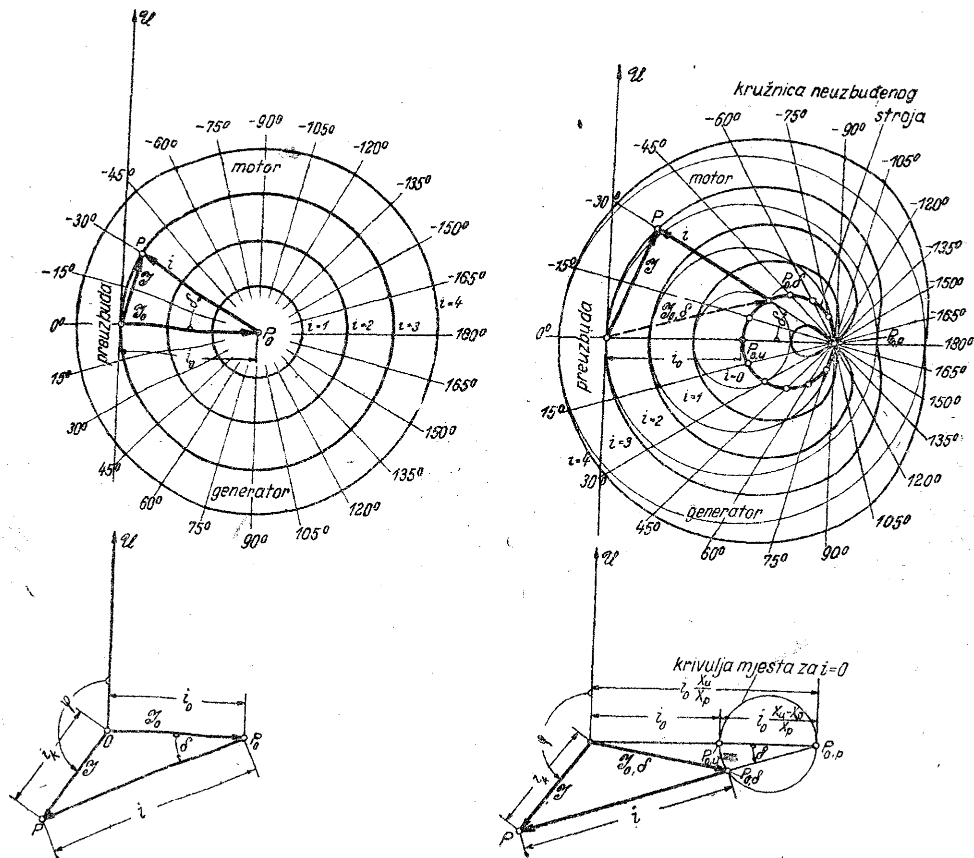
Određivanje uzbudne struje i promjena napona po američkim standardima (ASA C 50-1936). Prema američkim standardima upotrebljavamo Potierov napon kao rasipni napon, da bismo odredili uzbudnu struju opterećenog sinhronog stroja. Treba poznavati: karakteristiku praznog hoda, karakteristiku kratkog spoja, odnosno uzbudnu struju u kratkom spoju i_k, te uzbudnu struju za $\cos\varphi = 0$ pri nominalnoj struji i nominalnom naponu. Konstrukcija dijagrama provedena je na sl. 103. Potierov napon U_{pot} određujemo, kako se vidi s prikaza. Djelatni pad napona $\sqrt{3} \cdot I \cdot R$ na slici je uzet u obzir, no redovno ga možemo zanemariti. U dijagramu smo uzeli linijske napone, jer je upotrebljena karakteristika praznog hoda za linijski napon. Na napon stezaljki $\mathfrak{U}$ nadovežemo djelatni i induktivni pad napona, te za EMS $\mathfrak{E}$, koju smo tako dobili, odredimo uzbudnu struju praznog hoda. Od ove međutim upotrebljavamo samo dio Δi, koji prelazi pravac raspora. Ukupnu uzbudnu struju i određujemo kao vektorsku sumu onog dijela $i_{o,r}$ uzbudne struje praznog hoda pri nominalnom naponu, koji otpada na raspor, i uzbudne struje kratkog spoja i_k. K tome algebarski pribrajamo Δi.

Vidimo, da ova konstrukcija, koja u pogledu jednostavnosti nešto zaostaje za švedskim standardima, daje za prazni hod i pogon kao popravljač faze točno iste vrijednosti kao i ona. U oba slučaja dobivamo uzbudnu struju i_0, odnosno $i_{\cos\varphi=0}$, koju smo faktično izmjerili. Za bilo kakva opterećenja uzbudne struje tek neznatno odstupaju jedna od druge.

Promjenu napona određujemo na uobičajeni način. S karakteristike praznog hoda uzmemo napon E_0, koji pripada struji i, te izrazimo razliku $E_0 - U_n$ u postocima od U_n.

Dijagram sinhronog stroja. Kod sinhronih strojeva treba razlikovati slučaj stroja s cilindričkim rotorom, i stroja s istaknutim polovima. U prve ubrajamo turbo-strojeve i sinhronizirane asinhrone strojeve, u druge obične

strojeve s istaknutim polovima. Stroj s cilindričkim rotorom može ići sinhrono samo onda kad je uzbuđen, dok stroj s istaknutim polovima ostaje u koraku i onda, kad je uzbudna struja nula, te ga čak možemo u tom stanju opteretiti sa 10 do 20% nominalnog momenta. U praznom hodu možemo čak kroz uzbudni namot slati malu uzbudnu struju obrnutog smisla.



a) Stroj s cilindričkim rotorom. b) Stroj s istaknutim polovima

Sl. 104. Krivulja mjesta i dijagram idealnog, nezasićenog sinhronog stroja bez gubitaka u izvedbi s cilindričkim rotorom (a) i s istaknutim polovima (b). Gore je ucrtano pogonsko stanje malo poduzbuđenog motora, dolje je prikazan dijagram preuzbuđenog generatora.

U slučaju (a) dobivamo uzbudnu struju i kao vektorsku razliku struje armature $\mathcal{J}$ i struje praznog hoda $\mathcal{J}_0$. Ove su, što se dužine tiče, prikazane kao i_k i i_0. $\mathcal{J}_0$ ne zavisi o otklonu polnog kotača δ. U slučaju (b) dobivamo i kao vektorsku razliku struje armature $\mathcal{J}$ i „struje praznog hoda“ $\mathcal{J}_{0,\delta}$, kojih dužine prikazuju i_k i $i_{0,\delta}$. $\mathcal{J}_{0,\delta}$ zavisi o otklonu polnog kotača δ, koji je opet određen radnom točkom P. Otklon polnog kotača δ je kut prethođenja kod generatora, a zaostajanja kod motora. Krivulje mjesta (a) su kružnice s polumjerom i, krivulje mjesta (b) Paskalove *krivulje,* koje možemo naći točku po točku, ako na po volji odabrane zrake kroz $P_{0,p}$ počevši od sjecišta s kružnicom neuzbuđenog stroja na obje strane nanosimo i. Ovu osnovnu kružnicu možemo konstruirati, ako nam je poznato X_u/X_p, a kako se određuje X_u i X_p vidi na str. 180.

Ovo međutim nije važno za pogon. Naprotiv, neuzbuđeni sinhroni stroj, koji nema uzbudnog namota, već ima samo kavez za zalet, primjenjuje se donekle kao t. zv. *reluktantni motor* za specijalne pogone male snage i za svrhe regulacije, gdje trebamo sinhronu brzinu vrtnje.

Stroj s cilindričkim rotorom ponaša se točno kao sinhronizirani asinhroni motor, kojega je dijagram opisan već na str. 123. Uzbudna struja i i struja armature I uzbuđuju zajedno magnetski tok stroja. Na sl. 104a prikazan je kružni dijagram još jednom, kako bismo ga mogli neposredno usporediti s dijagramom stroja s istaknutim polovima. Kako je kod sinhronog stroja udobnije bazirati dijagram na uzbudnoj struji, koju možemo lako mjeriti, izražavamo mrežnu struju I pripadnom uzbudnom strujom kratkog spoja i_k. Mjerilo za mrežnu struju jednako je prema tome odabranom mjerilu za uzbudnu struju pomnoženom sa I_n/i_k.

Sa dijagrama možemo dobiti relaciju za prekretni moment stroja s cilindričkim rotorom, koja predstavlja dobro približenje, naime:

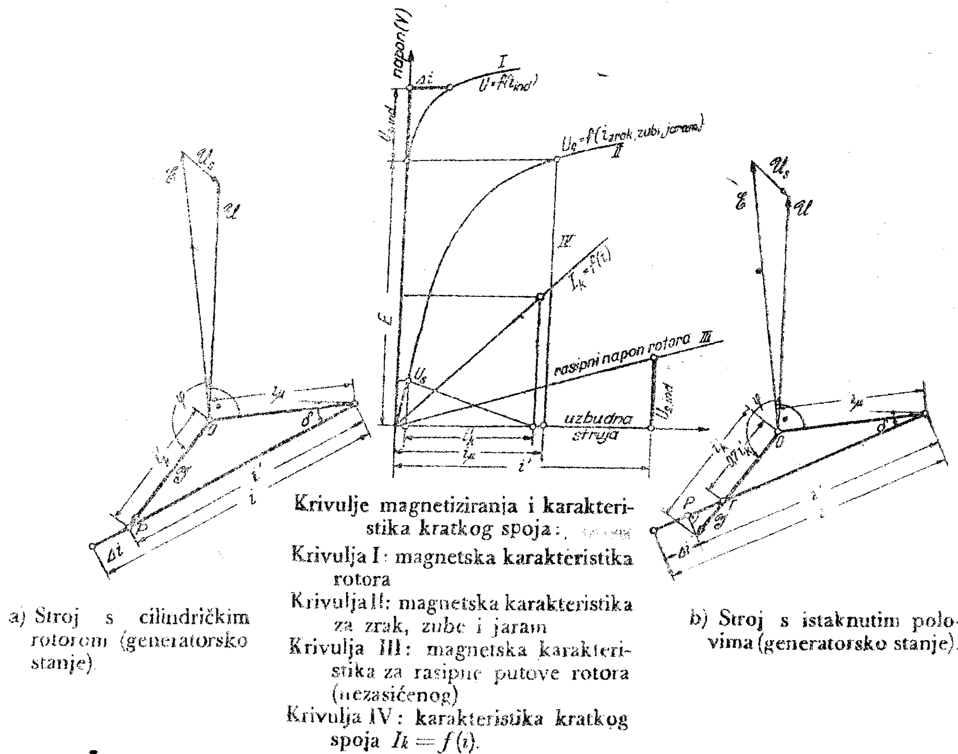
$$M_{prekr} = M_n \cdot \frac{i}{i_k \cdot \cos\varphi},$$

gdje je i uzbudna struja kod nominalnog rada. Kako i zavisi o uzbudnoj struji praznog hoda i_0, raste preopteretivost jako, kad raste uzbudna struja praznog hoda. I mali $\cos\varphi$ faznog prethođenja kod punog opterećenja djeluje također povoljno na preopteretivost. Treba li on, kako se to kod motora često zahtijeva, da bude 1,0, moramo raspor sinhronog motora povećati prema normalnoj izvedbi, da bismo gubitak zbog dobrog faktora snage opet izjednačili povećanom uzbudom u praznom hodu (vidi str. 125).

Dijagram za *stroj s istaknutim polovima* prikazan je na sl. 104b. Vidimo, da stroj s istaknutim polovima može i u neuzbuđenom stanju da daje određenu motorsku ili generatorsku snagu. Nazovemo li struju armature neuzbuđenog stroja »strujom praznog hoda«, onda treba sve struje, koje su određene kružnicom neuzbuđenog stroja označivati kao struje praznog hoda. Njihova veličina zavisi samo o električkom kutu δ, za koji je zakrenut polni kotač. Uzbudnu struju za bilo koju struju armature $\mathcal{J}$ dobivamo, uz tu pretpostavku, na isti način kao kod stroja s cilindričkim rotorom kao vektorsku razliku struja $\mathcal{J}$ i $\mathcal{J}_{0\delta}$, odnosno i_k i $i_{0,\delta}$. Ovime je određena i konstrukcija krivulje mjesta. Kroz točku praznog hoda za poprečni položaj $P_{0,p}$ položimo niz zraka. Na ove nanosimo uzbudnu struju i, počevši od sjecišta s kružnicom praznog hoda na obje strane, te povežemo međusobno točke, koje smo dobili uz konstantne vrijednosti i. Vidimo, da zbog međupolnih prostora izlaze krivulje mjesta, koje se samo u dvije točke, koje leže jedna drugoj nasuprot, podudaraju s kružnicom stroja s cilindričkim rotorom. U ostalom dijelu teče krivulja stroja s istaknutim polovima izvan kružnice stroja s cilindričkim rotorom. Veća je razlika u pogledu kuta za-

kreta polnog kotača δ, koji izlazi manji uz iste djelatne snage. To međutim znači, da je sinhronizacioni moment stroja s istaknutim polovima veći nego onaj kod stroja s cilindričkim rotorom. Kružnicu praznog hoda možemo naći, ako neuzbuđeni i na mrežu priključeni stroj prikladnim pogonskim strojem dovedemo do sasvim polagana klizanja. Najmanja struja daje točku P_{0,r_u}, a najveća struja točku P_{0,r_p}. Kroz obje točke položimo kružnicu sa središtem na horizontali (vidi str. 180.).

Oba dijagrama, kružnica za stroj s cilindričkim rotorom i Paskalova krivulja za stroj s istaknutim polovima, vrijede u prikazanom obliku samo za *nezasićeni stroj* s tako malim otporom armature da ga možemo zanemariti. Za moderne, visoko iskorištene strojeve nemaju praktična značenja, jer tu možemo očekivati i odviše velika odstupanja. Velika im je vrijednost, što pomažu uvid u unutarnje prilike obiju vrsta strojeva.



a) Stroj s cilindričkim rotorom (generatorsko stanje).

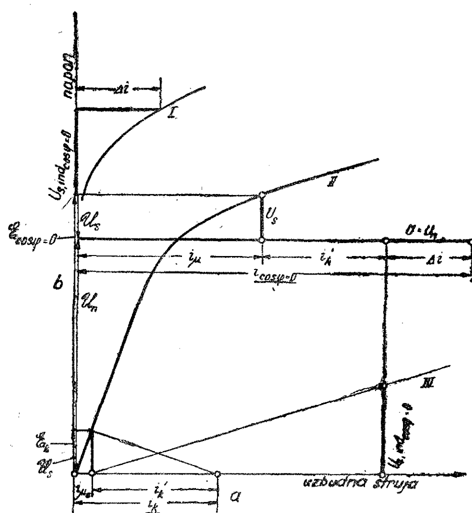
Krivulje magnetiziranja i karakteristika kratkog spoja:
Krivulja I: magnetska karakteristika rotora
Krivulja II: magnetska karakteristika za zrak, zube i jaram
Krivulja III: magnetska karakteristika za rasipne putove rotora (nezasićenog)
Krivulja IV: karakteristika kratkog spoja $I_k = f(i)$.

b) Stroj s istaknutim polovima (generatorsko stanje).

Sl. 105. Dijagram zasićenog sinhronog stroja uz uobičajeno zanemarenje djelatnog pada u armaturi. (i_μ = struja magnetiziranja za *EMS* E, i'_k = reakcija armature za struju armature I u uzdužnom položaju. $0{,}7\,i'_k$ = reakcija armature u poprečnom položaju. i' = uzbudna struja uz nezasićeni rotor; Δi = dodatna uzbuda zasićenog rotora; i = faktična uzbudna struja. δ = kut polnog kotača, prema dolje: prethodi kod generatorskog pogona, prema gore: zaostaje kod motorskog pogona. φ = fazni kut između $\mathcal{U}$ i $\mathcal{I}$, manji od 90° kod motorskog, veći od 90° kod generatorskog pogona. U_s = napon rasipa armature kod struje I. $U_{s_{ind}}$ = napon rasipa rotora kod uzbudne struje i'.)

Kod dalje opisanih dijagrama uzimamo u obzir još i *zasićenje*. Da bismo ih konstruirali, potrebne su nam krivulje toka u polu, toka u aktivnom dijelu: rasporu, zubima i jarmu armature, te rasipnog toka polova, sve u zavisnosti o uzbudnoj struji. Osim toga moramo poznavati: rasipni napon statora, reakciju armature i kod stroja s istaknutim polovima omjer jalovog otpora kod uzdužnog smjera glavnog toka prema jalovom otporu kod poprečnog smjera glavnog toka, koji možemo općenito uzeti 1 : 0,7.

Na sl. 105a prikazana je konstrukcija za stroj s cilindričkim rotorom, koja je odmah razumljiva, a na sl. 105b reproducirana je konstrukcija, koja vrije . za stroj s istaknutim polovima. U ovim dijagramima mrežnu struju $\mathcal{J}$ ne predstavlja uzbudna struja kratkog spoja i_k, već reakcija armature i_k mar a od i_k za struju magnetiziranja $i_{\mu s}$, koja odgovara rasipnom naponu U nezasićenog stroja. (Vidi dalje).



Sl. 106. Određivanje uzbudne struje u kratkom spoju: i_k (a) i u pogonu kao popravljač faze uz $\cos\varphi = 0$ i nominalni napon: $i_{\cos\varphi = 0}$ (b)

U oba dijagrama ucrtan je kut zakreta polova δ. Kako kod normalnog ispitivanja ne određujemo karakteristiku zasićenja za polove, kao ni rasipni tok polova ni karakteristiku za aktivni dio, ne možemo na temelju rezultata mjerenja crtati oba ova točna dijagrama, na kojima se osniva proračun strojeva. No po njima razabiramo utjecaj zasićenja polova u porastu, koji je gdjekada vrlo jak.

Na sl. 106 prikazan je razumljiv dijagram kratko spojenog sinhronog stroja, koji radi sa $\cos\varphi = 0$ pri nominalnom naponu. Razabiramo, kako je moguće odrediti reakciju armature i_k iz pokusa kratkog spoja, ako poznajemo rasipni napon armature U_s koji se određuje pokusom rasipa u provrtu.

Karakteristične veličine sinhronog stroja i njihovo eksperimentalno određivanje.[1] Postoji niz karakterističnih veličina sinhronog stroja, koje su osobito značajne za preopteretivost, stabilnost, vrijednosti trajnog i udarnog kratkog spoja, za ponašanje kod nesimetričnog opterećenja ili opterećenja nultočke, te za besprikoran rad kod pulzirajućeg pogonskog momenta ili momenta opterećenja. Poznajemo li ove veličine, možemo međusobno uspoređivati strojeve različita podrijetla. Ne treba zaboraviti, da svi jalovi otpori manje ili više jako zavise o stupnju zasićenja stroja, pa treba stoga navesti, da li se radi o zasićenoj ili nezasićenoj vrijednosti.

[1] Dijelom prema prijedlozima AIEE. (American Inst. of El. Eng.). Opaska autora.

O m j e r   k r a t k o g   s p o j a. Pod omjerom kratkog spoja razumijevamo omjer uzbudne struje praznog hoda pri nominalnom naponu prema uzbudnoj struji kratkog spoja pri nominalnoj struji, dakle

$$\text{omjer kratkog spoja} = i_0/i$$

ili identični omjer: struja trajnog kratkog spoja pri uzbudi praznog hoda prema nominalnoj struji, dakle:

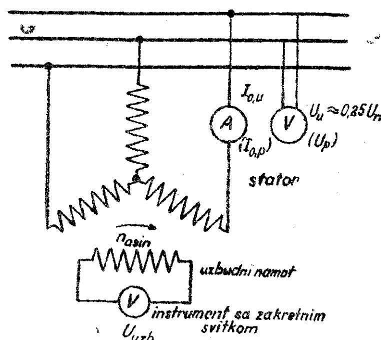
$$\text{omjer kratkog spoja} = I_{k_0}/I_n.$$

Što je veći omjer kratkog spoja, to je veća i preopteretivost sinhronog stroja. Za preopteretivost vrijedi:

$$\frac{M_{prekr}}{M_n} \approx \sqrt{1 + \left(\frac{i_0}{i_k \cdot \cos\varphi} + \operatorname{tg}\varphi\right)^2}.$$

Strojevi s velikim tokom imaju veći, a strojevi s velikim strujnim oblogom manji omjer kratkog spoja. Općenito leži vrijednost između 0,8 i 1,5.

S i n h r o n a   r e a k t a n c i j a X. Pojedine definicije sinhrone reaktancije odstupaju u literaturi, kao i u praksi jedna od druge.. Kod nezasićenog stroja se, naprotiv, podudaraju. Pod sinhronom reaktancijom razumijevamo jalovi otpor po fazi, koji predstavlja za napon mreže stroj, koji ide sinhrono, ali nije uzbuđen. Kod transformatora i asinhronih motora nazivamo istu veličinu reaktancijom praznog hoda. Ona dakle ne predstavlja ništa drugo nego omjer napona praznog hoda po fazi, i struje, koju stroj uzima iz mreže u praznom hodu po fazi, ako zanemarimo otpor armature, što je uvijek dopustivo. Sinhrona reaktancija neposredno zavisi o recipročnoj vrijednosti veličine djelatnog raspora. Kod stroja s istaknutim polovima imali bismo prema toj definiciji za svaki položaj polnog kotača δ drugu sinhronu reaktanciju. Razlikujemo međutim samo reaktanciju u uzdužnom položaju X_u i u poprečnom položaju X_p. Ova mora biti manja od X_u zbog većeg nadomjesnog raspora, koji odgovara međupolnom prostoru. Općenito je sinhrona reaktancija u poprečnom položaju 70 do 75% one u uzdužnom položaju. U sinhronoj reaktanciji je već sadržan rasipni otpor namota armature, prema jednadžbi:



Sl. 107. Određivanje sinhronih reaktancija X_u i X_p magnetiziranjem iz mreže neuzbuđenog sinhronog stroja, koji gonimo sa sasvim malim klizanjem. Priključeni napon cca 25% nominalnog napona. Sinhrona reaktancija u uzdužnom položaju $X_u = \frac{U_u}{\sqrt{3} \cdot I_{0,u}}$, kad je $U_{uzb\sim} = 0$. Sinhrona reaktancija u poprečnom položaju $X_p = \frac{U_p}{\sqrt{3} \cdot I_{0,p}}$, kad je $U_{uzb\sim} = \pm$ maksimum (uzbudni namot otvoren!).

sinhrona reaktancija = rasipna reaktancija armature + reaktancija glavnog polja.

Sinhronu reaktanciju definiramo obično ovako:

Uzdužni položaj: $X_d = \frac{\text{napon po fazi}}{\text{trajna struja kratkog spoja po fazi}}$

uz istu uzbudnu struju kod nezasićenog stroja,

$$= \frac{\text{napon po fazi}}{\text{struja armature po fazi}}$$

kod neuzbuđenog stroja pri uzdužnom položaju; odnosno procentualna vrijednost:

$$\frac{X_d\,\%}{100} = \frac{\text{uzbudna struja kratkog spoja pri nominalnoj struji}}{\text{dio uzbudne struje praznog hoda pri nominalnom naponu koji otpada na raspor}}$$

Vidimo, da se ova definicija procentualne sinhrone reaktancije kod nezasićenog stroja podudara s recipročnom vrijednosti omjera kratkog spoja. Pomnožimo li obje vrijednosti, dobit ćemo prema tome omjer ukupne uzbudne struje praznog hoda i onog njezinog dijela, koji otpada na raspor, dakle neku mjeru za stupanj zasićenja stroja.

Poprečni položaj: $X_p = \frac{\text{napon po fazi}}{\text{struja armature po fazi}}$

u poprečnom položaju neuzbuđenog, nezasićenog stroja.

X_u i X_p su dakle nezasićene veličine. Određujemo ih eksperimentalno pokusom praznog hoda na neuzbuđenom sinhronom stroju, koji ide s posve malim klizanjem. Sinhroni stroj priključimo na mrežu nominalne frekvencije i cca 25% nominalnog napona, te ga pogonskim strojem odgovarajuće veličine dovedemo do brzine, koja tek posve malo odstupa od sinhrone brzine vrtnje. Struja praznog hoda, koju stroj uzima iz mreže, koleba amo tamo od minimalne vrijednosti u uzdužnom položaju do cca 30 do 50% veće maksimalne vrijednosti u poprečnom položaju. Minimalnu vrijednost $I_{0,u}$ očitavamo kad voltmetar (najbolje sa zakretnim svitkom!), priključen na klizne kolute otvorenog uzbudnog namota pokazuje inducirani napon nula. Maksimalnu struju $I_{0,p}$, očitavamo, naprotiv, kad je inducirani napon na kliznim kolutima maksimalan. Ako se s varijacijama struje mijenja i napon mreže, treba ga očitavati istovremeno sa strujom. Njegove vrijednosti označimo indeksima u u uzdužnom i p u poprečnom položaju. Onda dobivamo:

$$X_u = \frac{U_u}{\sqrt{3} \cdot I_{0,u}} \qquad X_p = \frac{U_p}{\sqrt{3} \cdot I_{0,p}}.$$

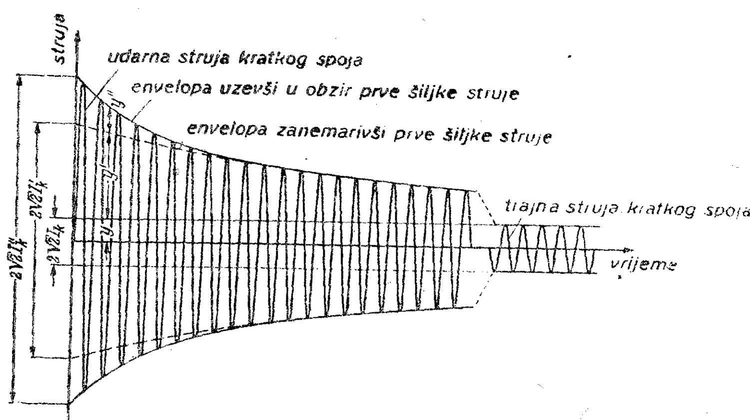
Na sl. 107 prikazan je spoj i protumačen ovaj pokus. On se osniva na identičnosti trajne struje kratkog spoja pri uzbudi praznog hoda i struje armature u praznom hodu neuzbuđenog, nezasićenog stroja u uzdužnom položaju. Čim stroj prijeđe u zasićeno stanje, postaje struja kratkog spoja uz uzbudu praznog hoda veća od struje armature neuzbuđenog stroja kod istog napona.

Nezasićena sinhrona reaktancija X_u određuje gornju granicu kapacitivnog otpora X_c, na koji sinhroni stroj još smije raditi, a da se sam ne uzbudi. Ovakve otpore predstavljaju dugački vodovi visokog napona i kabelske mreže. Zbog boljeg uspoređivanja i opet upotrebljavamo procentualnu vrijednost te govorimo o procentualnoj *snazi nabijanja* u granicama samouzbude, koja je definirana sa:

snaga nabijanja u postocima nominalne snage u granicama samouzbude

$$= \frac{100}{X_u\%} \cdot 100.$$

Letimična reaktancija udarnog kratkog spoja X'' je jalovi otpor, koji se suprotstavlja nenadanim simetričnim promjenama



Sl 108. Određivanje letimične udarne reaktancije X''_u i udarne reaktancije X'_u u uzdužnom položaju iz oscilograma udarnog kratkog spoja. (Zasićene vrijednosti.)

$X''_u = \frac{U_0}{\sqrt{3}\, I''_k}$ $X'_u = \frac{U_0}{\sqrt{3}\, I'_k}$ U_0 = linijski napon u praznom hodu prije pokusa udarnog kratkog spoja.

Razlika ordinata: y je konstantna i jednaka $\sqrt{2} \cdot I_k$

y' iščezava eksponencijalno s vremenskom konstantom kratkog spoja T'_u

y'' iščezava eksponencijalno s letimičnom vremenskom konstantom kratkog spoja T''_u

y' i y'' možemo odijeliti, ako prikažemo $y' + y' = f$ (vremena) na polulogaritamskom papiru.

opterećenja u prvom času. Općenito određujemo ovu reaktanciju iz rezultata pokusa udarnog kratkog spoja. Dobivamo vrijednost za uzdužni položaj, i to zasićenu vrijednost, jer struja udarnog kratkog spoja predstavlja višestruku vrijednost nominalne struje. Pokusom na mirnom stroju možemo odrediti i umjereno zasićenu vrijednost, i to, prema položaju polnog kotača, vrijednost za uzdužni i vrijednost za poprečni položaj.

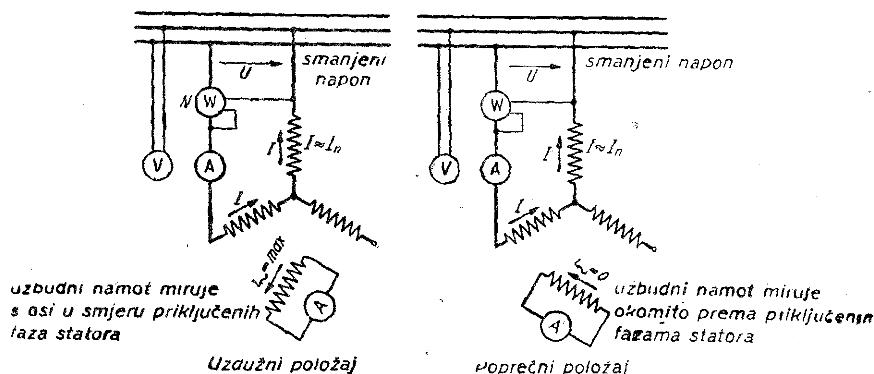
Uzdužni položaj: X_u'' iz pokusa udarnog kratkog spoja. Ucrtamo kao na sl. 108 envelopu na udarnu struju kratkog spoja i produžimo je unatrag

do početnog momenta. Pritom treba uzeti u obzir prve titraje struje, koji osobito brzo zamiru. Podijelimo dvostruku tjemenu vrijednost struje sa $2 \cdot \sqrt{2}$ te dobijemo efektivnu vrijednost letimične udarne struje kratkog spoja. Odavle i iz vrijednosti napona praznog hoda prije početka pokusa udarnog kratkog spoja izlazi:

$$X_u'' = \frac{U_0}{\sqrt{3} \cdot I_k''} \quad \text{(jako zasićena vrijednost).}$$

Poprečni položaj: X_p'' teško je odrediti, kad stroj ide. Općenito mjerimo na mirnom stroju niže opisanim pokusom.

Uzdužni položaj: X_u'' iz pokusa na mirnom stroju. Izvedemo pokus, prikazan na sl. 109 s mirnim, dvopolno priključenim strojem, kojemu je uz-



Sl. 109. Određivanje letimične udarne reaktancije X''_u i X''_p u uzdužnom i u poprečnom položaju kod zaustavljenog, jednofazno priključenog sinhronog stroja (nezasićene vrijednosti, zbog $I \approx I_n$).

$X''_u = \frac{U \sin \varphi}{2I} \approx \frac{U}{2I}$, kad je $i_\sim$ u uzbudnom namotu maksimum.

$X''_p = \frac{U \sin \varphi}{2I} \approx \frac{U}{2I}$, kad $i_\sim$ u uzbudnom namotu iščezne.

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \left(\frac{N}{UI}\right)^2}.$$

budni namot kratko spojen. Ampermetar, uključen u kratko spojeni uzbudni krug (frekvencija mreže!), pokazuje nam, da li je tamo vrijednost struje kratkog spoja maksimalna ili nula. Ako je U priključeni napon, a I struja, koja teče u serijski spojenim namotima, dobivamo:

$$X_u'' \approx \frac{U}{2I},$$

kad struja u uzbudnom namotu dosegne maksimalnu vrijednost. Općenito stoji polni kotač u bilo kojem položaju, te ga treba tako dugo zakretati, dok struja u uzbudnom namotu ne bude maksimalna.

Poprečni položaj: X_p'' iz pokusa na mirnom stroju. Istim pokusom određujemo letimičnu reaktanciju udarnog kratkog spoja u poprečnom položaju. Polni kotač treba sada tako dugo zakretati, dok struja kratkog spoja, koja se inducira u uzbudnom namotu, ne bude nula. Tada je:

$$X_p'' \approx \frac{U}{2I}.$$

Oba jalova otpora zavise o jakosti struje, koju dovodimo stroju. Kako s obzirom na zagrijavanje, u prvom redu uzbudnog namota turbostrojeva, ne smijemo znatno prekoračiti ¼ nominalne struje, dobivamo praktički nezasićene ili tek vrlo slabo zasićene vrijednosti. Ove leže cca 25% iznad iznosa dobivenih kod pokusa udarnog kratkog spoja, koji prema tome iznose cca 80% od otpora, koje dobivamo pokusom na zaustavljenom stroju.

Reaktancija udarnog kratkog spoja X'. Kod strojeva bez prigušnog kaveza ili bez masivnih polnih nastavaka ovaj je jalovi otpor identičan s letimičnom reaktancijom. To je dakle jalovi otpor, koji bi stroj imao kod udarnog kratkog spoja, kad bismo izvadili postojeći prigušni namot ili kad bismo zamijenili masivne nastavke lameliranima. On je veći od letimične reaktancije, jer prigušni namot i masivni nastavci povećavaju udarnu struju kratkog spoja. (Usporedi dvokavezni asinhroni motor, kod kojega bi se struja kratkog spoja nakon otstranjivanja gornjeg kaveza smanjila na 50 do 75%!). Dobivamo ga iz pokusa kratkog spoja na isti način kao i letimičnu reaktanciju, ako crtamo envelopu tako, da zanemarimo prve titraje struje, koji osobito brzo zamiru. Oni iščezavaju to brže, što manje materijala je utrošeno u prigušni kavez i što je manja vodljivost upotrebljenog materija. U ovim slučajevima dolazi uglavnom do izražaja reaktancija udarnog kratkog spoja. Označimo li sa I_k' unatrag ekstrapoliranu efektivnu vrijednost struje udarnog kratkog spoja, bit će prema sl. 108:

Uzdužni položaj: $$X_u'' = \frac{U_0}{\sqrt{3} \cdot I_k'}$$

(jako zasićena vrijednost, ne smijemo uzeti u obzir prve titraje struje).

Poprečni položaj: U poprečnom položaju podudara se jalovi otpor udarnog kratkog spoja kod stroja s istaknutim polovima sa sinhronom reaktancijom za poprečni položaj, dakle $X' = X_p$.

Protusmjerna reaktancija i nul-reaktancija. U slučaju nejednakog opterećenja faza možemo sistem struja sinhronog stroja rastaviti u jedan sistem istoga smjera i jedan suprotnoga smjera, ako nultočka ostaje neopterećena. Ako je i ova opterećena, pojavljuje se još jedan mirni ili nul-sistem, koji sačinjavaju komponente struja, koje teku istofazno u sva tri namota, i odlaze preko nultočke. Stroj suprotstavlja strujama ove otpore:

X_u'' i X_p'' istohodnom sistemu (letimična reaktancija udarnog kratkog spoja)

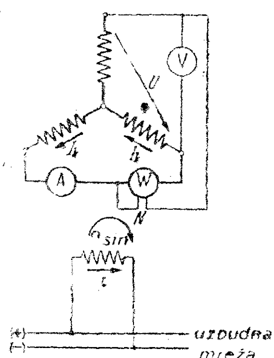
X_2 protuhodnom sistemu (protusmjerna reaktancija)

X_0 nul-sistemu (nul-reaktancija).

Protusmjerna reaktancija X_2 je praktički isto tolika, kao i letimična reaktancija udarnog kratkog spoja, te se često navodi istom veličinom. Točnije uzimamo vrijednost:

$$X_2 = \frac{1}{2}(X_u'' + X_p'').$$

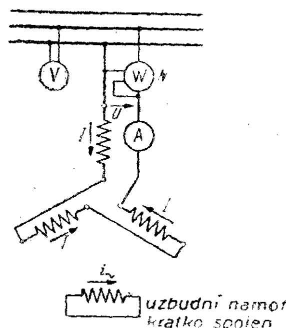
Pokusom je možemo odrediti na slijedeći način: Prema spoju u sl. 110 sinhroni stroj, koji ide, dvopolno kratko spojimo, i mjerimo trajnu struju



Sl. 110. Određivanje protusmjerne reaktancije X_2 kod sinhrono gonjenog, dvopolno kratko spojenog sinhronog stroja.

$$X_2 = \frac{U \cdot \cos\varphi}{\sqrt{3}\, I_k} \approx \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_k},$$

$$\cos\varphi = \frac{N}{U\, I_k}.$$



Sl. 111. Određivanje nulreaktancije X_0. Sve tri faze spojene u seriju i priključene jednofazno. Sinhroni stroj gonimo sinhrono ili on miruje.

$$X_0 = \frac{U \sin\varphi}{3I} \approx \frac{U}{3I},$$

$$\sin\varphi = \sqrt{1 - \left(\frac{N}{U\, I}\right)^2}.$$

kratkog spoja i napon između slobodne stezaljke s jedne strane, i jedne od ostalih dviju stezaljki, dakle kratkospojnog veznika s druge strane. Dobivamo:

$$X_2 \approx \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_k}$$

gdje je U izmjereni napon, a I_k izmjerena struja kratkog spoja. Ova vrijednost za X_2 je praktički nezasićena.

Nulreaktanciju X_0 određujemo pokusom na stroju, koji se okreće ili koji stoji, a uzbudni mu je namot kratko spojen. Namot armature, spojen u

otvoreni trokut, priključimo na napon U i mjerimo struju I, koju uzima. Ovaj pokus odgovara istom pokusu kod transformatora. Dobivamo

$$X_0 \approx \frac{U}{3I}$$

kao nezasićenu vrijednost. X_0 vrlo jako zavisi o skraćenju namota armature, te je najmanje kod namota s korakom ²/₃. Vrijednost mu je oko ¹/₃ vrijednosti X_d'' kod normalnoga namotnog koraka od 83%, a oko ¹/₆ kod namotnog koraka od 66,6% polnog koraka.

P o t i e r o v n a p o n i P o t i e r o v a r e a k t a n c i j a. Kod sinhronog stroja s nezasićenim polovima možemo dobiti rasipni napon, a time i rasipnu reaktanciju armature unošenjem t. zv. *Potierovog trokuta*. Zbog visokog iskorištenja presjeka polova kod modernih strojeva, činimo zaista pogrešku, kad zanemarujemo onaj znatni dio AZ, koji otpada na polove. Ovu pogrešku ispravljamo doduše dobrim dijelom drugom pogreškom, kada kod konstrukcije trokuta ne upotrebljavamo krivulju zasićenja za aktivni dio: zrak, zube i jaram armature, već karakteristiku praznog hoda, koju smo dobili pokusom praznog hoda. Ipak nam Potierovom konstrukcijom određeni Potierov napon pruža dobar oslonac, da odredimo rasipni napon namota armature. Potierovu reaktanciju dobivamo, kad podijelimo Potierov napon s $\sqrt{3}$-strukom strujom armature. Kako je prikazano na str. 174, Potierov napon upotrebljavamo prema američkim standardima, da bismo odredili jakost uzbudne struje za bilo koje opterećenje i fazni pomak.

Potierov napon izražavamo najbolje u postocima nominalnog napona stroja. Dobivamo vrijednosti između 8 i 20%. On nam daje dobru mogućnost usporedbe sličnih strojeva.

Konstrukciju Potierovog trokuta vidimo na sl. 103.

V l a s t i t a f r e k v e n c i j a t i t r a n j a s i n h r o n o g s t r o j a. Svakom opterećenju sinhronog stroja odgovara određeni kut zakreta polnog kotača prema položaju praznog hoda. Taj kut označavamo sa δ i mjerimo ga u električkim stupnjevima, koji su p puta veći od odgovarajućih prostornih kutova u stupnjevima. p je polovica broja polova stroja. Ako udarac opterećenja ili iznenadno rasterećenje udalji polni kotač iz dosadašnjeg položaja ili ga dovede u novi položaj, zauzet će on stari, odnosno novi položaj tek poslije nekoliko njihaja. Djelovanje sinhronizacione sile ubrzava zamašne mase i dovodi tako do njihanja. Vlastita frekvencija ovih titraja odnosno pripadno trajanje vlastitog titraja zanima nas u onim slučajevima, gdje pogonski moment ili moment opterećenja pulzira. Frekvencija ovih pulzacija mora biti bar za 30% udaljena od vlastite frekvencije sinhronog stroja, da bismo izbjegli opasne pojave rezonancije. Prikladnom veličinom zamašnog momenta možemo to uvijek postići. Vlastita frekven-

cija sinhronog stroja zavisi o veličini uzbude i obrnuto o veličini GD^2. O frekvenciji mreže je u širokim granicama nezavisna. Ova se doduše pojavljuje u niže navedenoj formuli uz sinhronu brzinu vrtnje, koja o njoj zavisi, no lako je raspoznati, da prividna zavisnost potječe odatle, što je iz praktičkih razloga uvedena nominalna snaga $N = \sqrt{3} \cdot U \cdot I/1000$. U neposredno zavisi o f, te ga možemo nadomjestiti sa $\Phi \cdot k \cdot f$, gdje je Φ magnetski tok, a k konstanta za određeni stroj. Pod korijenom se onda pojavljuje f^2, pa možemo korijen iz f^2 kratiti sa f u sinhronoj brzini vrtnje $n_{sin} = 60f/p$ ispred korijena.

Vlastitu frekvenciju titranja prikladno je izraziti u titrajima na minutu, da bismo dobili neposrednu usporedbu s frekvencijom titranja zbog pulzacija pogona ili opterećenja, jer se ova podudara s polovinom, dvostrukom vrijednosti ili pravom vrijednosti brzine vrtnje, t. j. poznat je broj titraja na minutu.

Formule se razlikuju kod stroja s cilindričkim rotorom i stroja s istaknutim polovima zbog međupolnog prostora, koji utječe na zakretni moment. One izgledaju za *neopterećeni* stroj ovako:

Stroj s cilindričkim rotorom:

$$f_{vl} = \frac{14\,460}{n_{sin}} \cdot \sqrt{\frac{N \cdot f}{GD^2} \cdot \frac{i'}{i_k}} \qquad \text{titraja/min.}$$

Stroj s istaknutim polovima

$$f_{vl} = \frac{14{,}460}{n_{sin}} \sqrt{\frac{N \cdot f}{GD^2} \cdot \frac{(i' + i_0/3)}{i_k}} \qquad \text{titraja/min,}$$

gdje znači:

$$14\,460 = \frac{18000}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{20}{\pi}}$$

n_{sin} = sinhrona brzina vrtnje u okr/min

N = nominalna snaga u kVA = $\sqrt{3} \cdot U \cdot I/1000$,

f = frekvencija mreže,

GD^2 = zamašni moment svih rotirajućih dijelova u m^2kg,

i_k = uzbudna struja kratkog spoja u A, koja odgovara struji I,

i_0 = uzbudna struja praznog hoda u A, koja odgovara naponu U,

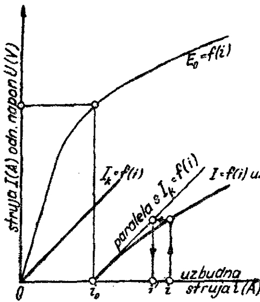
i' = reducirana uzbudna struja prema sl. 112.

Kad je opterećen, stroj titra nešto polakše.

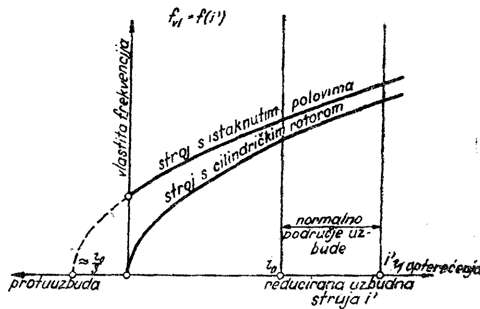
Razabiramo, da vlastita frekvencija titranja stroja s cilindričkim rotorom raste s korijenom uzbudne struje unutar područja, u kojem se reducirana uzbudna struja i' podudara s faktičnom uzbudnom strujom i. (Kod većih uzbudnih struja raste ona polakše.) Pri uzbudi nula gubi stroj sposobnost titranja. Sl. 113 prikazuje zavisnost $f_{vl} = f(i')$.

Stroj s istaknutim polovima sposoban je da titra i kod uzbude nula. To se zasniva na reakcionoj sili istaknutih polova, koji se sami od sebe nastoje postaviti u os narinutog magnetskog toka. Njegova krivulja $f_{vl} = f(i')$ odgovara zato krivulji stroja s cilindričkim rotorom, pomaknutoj za iznos $i_0/3$ nalijevo. Vrijednost 1/3 glasila bi točno $(X_u - X_p)/X_p$, gdje je X_u sinhrona reaktancija u uzdužnom položaju, a X_p u poprečnom položaju. 1/3 odgovara omjeru $X_p/X_u = 0{,}75$, koji u praksi često nalazimo.

Mjerenje vlastite frekvencije titranja vrlo je jednostavno, no možemo ga izvesti samo oscilografom. Dovoljno je uz poznati pomak papira snimiti struju armature. Uz pomoć istosmjernog stroja opteretimo preko spojke sinhroni stroj sa cca 25% nominalne snage, te ga naglo rasteretimo. Nakon nekoliko sekunda završimo snimanje. Dobro je da opetujemo pokus



Sl. 112. Redukcija uzbudne struje i na i' kod izračunavanja vlastite frekvencije njihanja sinhronog stroja.



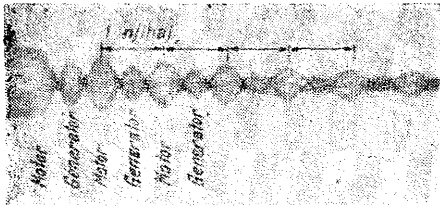
Sl. 113. Zavisnost vlastite frekvencije njihanja sinhronog stroja o reduciranoj uzbudnoj struji. Stroj s istaknutim polovima može još i neuzbuđen njihati zbog reaktivnog djelovanja polova.

za jednu ili dvije promijenjene uzbudne struje, pri čemu po mogućnosti odaberemo i struju praznog hoda i_0. Osim uzbudne struje treba očitati samo još napon U trofazne mreže. Umjesto I, koja vrijednost kod pokusa nije ni od kakva značenja, uvrštavamo u formulama uvijek nominalnu struju, za I_k uvrštavamo pripadnu uzbudnu struju kratkog spoja, a za U, naprotiv, mjerenu vrijednost. Sl. 114 prikazuje dva oscilograma, jedan kod uzbude praznog hoda, drugi kod uzbude za polovicu opterećenja. Prividno titranje s dvostrukom frekvencijom nastaje zbog toga, što se stroj zanjiše preko nul-položaja u generatorsko područje, gdje struja unutar iste periode opet poraste. No ona ne će dosegnuti istu vrijednost kao u motorskom području, jer stroj titra oko položaja, koji je malo pomaknut u motorsko područje (gubici trenja + gubici u željezu).

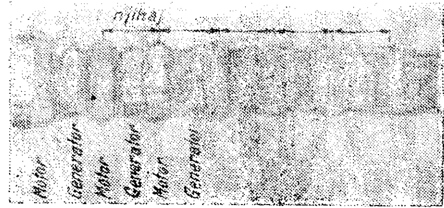
Zakretni momenti sinhronog stroja. M o m e n t o m m i r o v a n j a ili poteznim momentom nazivamo kod strojeva, koji sami kreću onaj mo-

ment, koji stroj razvija, dok još miruje. Kao i kod asinhronog motora zavisi ovaj o kvadratu priključenog napona. No nikada ne mjerimo kao tamo, dok stroj miruje s pomoću poluge ili istosmjernog stroja, koji pojimo suprotnom strujom, nego uvijek pokusom zaleta. Razradimo početnu točku krivulje zaleta, te dobivamo srednji potezni moment. Promjene zavisne o položaju rotora ne možemo na ovaj način ustanoviti.

M i n i m a l n i m   z a l e t n i m   m o m e n t o m nazivamo najmanji moment za čitavo vrijeme zaleta od mirovanja do prekretnog momenta. Vrijednost treba da mu je bar 30% nominalnog zakretnog momenta.



Uzbudna struja praznog hoda



Uzbudna struja polovine punog opterećenja

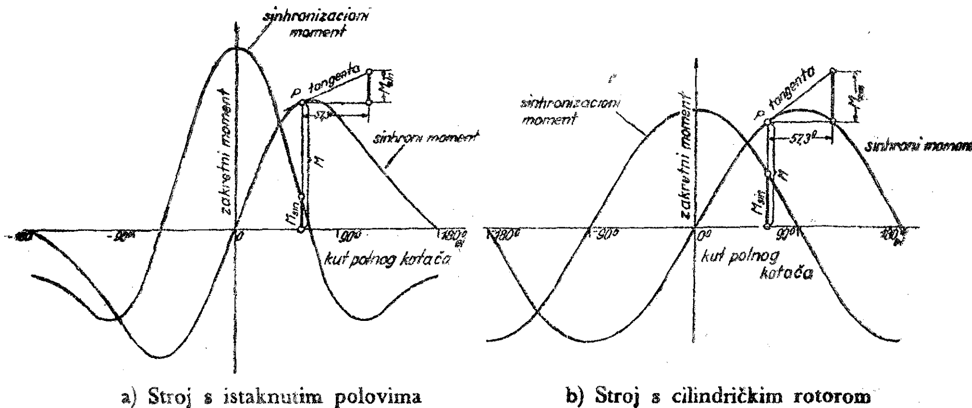
Sl. 114. Određivanje vlastite frekvencije njihanja sinhronog stroja (motora) u praznom hodu oscilografskim snimanjem mrežne struje. Impuls za njihanje dajemo naglim rasterećenjem od malog opterećenja na prazni hod. Stroj njiše od motorskog položaja polnog kotača do generatorskog i natrag. Vlastita frekvencija njihanja kod opterećenja opada s korijenom iz »sinhronizacionog momenta«.

U s k o č n i   m o m e n t sinhronog stroja je onaj najveći zakretni moment opterećenja, koji motor, pošto smo uključili u povoljnom momentu uzbudu, može još sa sigurnošću svladati, kada ubacuje svoju vlastitu i druge priključene zamašne mase u korak. Ovaj zakretni moment zavisi dakle, kako o momentu opterećenja, tako i o zamašnom momentu. Osim toga zavisi jako i o jakosti uzbudne struje. Njezinu normalnu vrijednost uzimamo kao bazu. Uz određene prilike možemo bez daljnjega mjeriti uskočni moment stroja. Moment opterećenja sve više i više povećavamo, i to tako dugo, dok stroj ne bude više sposoban da pođe sinhrono. Uzbudu uključimo u času, kad struja klizanja, koja se inducira u uzbudnom namotu upravo bude istoga smjera kao istosmjerna struja, koju treba uključiti, što u gotovim uređajima gdjekada nadziru polarizirani releji. Razabiramo to po ugrađenom ampermetru sa zakretnim svitkom.

N o m i n a l n i m   u s k o č n i m   m o m e n t o m zove se, za razliku od uskočnog momenta onaj zakretni moment, koji razvija sinhroni stroj kod 95% sinhrone brzine vrtnje, dakle kod 5% klizanja. Ovaj moment, veličine od 75 do 100% nominalnog momenta, omogućuje nam dobru usporedbu sličnih strojeva u slučajevima, kada zamašni momenti opterećenja nisu poznati. Možemo ga mjeriti pokusom opterećenja na neuzbuđenom stroju, koji još nije uskočio u korak, na isti način, kao kod asinhronog motora.

S i n h r o n i m m o m e n t o m nazivamo, za razliku od asinhronog momenta za vrijeme zaleta motora, zakretni moment, koji stroj razvija kod sinhrone brzine. Uz zadanu uzbudnu struju zavisi on samo o kutu zakreta polnog kotača (sl. 115a, b). Kod strojeva s cilindričkim rotorom zavisi on o sinδ, kod strojeva s istaknutim polovima osim toga još i o sin 2δ, zbog reaktivne sile polova.

S i n h r o n i z a c i o n i m o m e n t je onaj moment, koji sinhroni stroj daje kada polni kotač nastojimo zakrenuti iz položaja, koji odgovara opterećenju bilo prema naprijed, bilo prema natrag. Ovaj moment je najveći u praznom hodu, nešto manji kod nominalnog opterećenja, a jednak nuli kod prekretnog opterećenja. On je proporcionalan kutu odstupanja od srednjeg položaja polnog kotača pri odgovarajućem opterećenju, kad je ovaj malen. Veličinu mu navodimo za sasvim određeni električni kut, i to



a) Stroj s istaknutim polovima b) Stroj s cilindričkim rotorom

Sl. 115. Sinhroni moment (M) i sinhronizacioni moment (M_{sin}) stroja s istaknutim polovima (a) i stroja s cilindričkim rotorom (b) u zavisnosti o električkom otklonu polnog kotača i grafičko određivanje ovog posljednjeg momenta za po volji odabrani otklon polnog kotača.

za kut u lučnoj mjeri 1,0, dakle kut od $180^0/\pi = 57{,}3^0$. Uz bilo koji kut β u lučnoj mjeri bit će faktični moment, koji vraća rotor jednak sinhronizacioni moment $\cdot\, \beta$, a uz kut β u stupnjevima: sinhronizacioni moment $\cdot\, \beta^0/57{,}3^0$. Sinhronizacioni moment možemo odrediti za svaki moment opterećenja, ako je poznata zavisnost sinhronog momenta stroja o otklonu rotora δ. Na sl. 115a, b prikazana je ta zavisnost za slučaj stroja s istaknutim polovima i stroja s cilindričkim rotorom. Bilo kojoj točki opterećenja P pripada otklon rotora δ. Povećamo li ovaj za kut β, pojavit će se dodatni zakretni moment ΔM, t. j. sinhronizacioni moment. Njegovu ćemo veličinu prema gornjoj definiciji dobiti, ako uvedemo umjesto bilo kojeg kuta β kut 1, odnosno $57{,}3^0$, no umjesto same krivulje zakretnog momenta upotrebimo tangentu u točki P. Dužinu, koja odgovara kutu 1, odnosno $57{,}3^0$, naći ćemo tako, da podijelimo dužinu poluperiode sa π. U

stvari ne predstavlja sinhronizacioni moment ništa drugo, nego nagib krivulje zakretnog momenta, t. j. njezin diferencijalni kvocijent. Što strmije teče krivulja momenta, to snažnije odgovara sinhroni stroj na svaki pokušaj, da zakrenemo polni kotač iz pravog položaja. Sinhronizacioni moment navodimo obično za slučaj praznog hoda uz nominalnu uzbudu, pri čemu možemo vrlo približno uzeti kod *strojeva s cilindričkim rotorom:*

sinhronizacioni moment u praznom hodu reduciran na kut 1, t. j. 57,3° = prekretni moment stroja.

To se odmah vidi sa sl. 115b. Kod *strojeva s istaknutim polovima* vrijednost je cca $(1 + i_0/3i')$ puta veća, gdje je i' reducirana uzbudna struja prema sl. 112. Sinhronizacioni moment mijenja se kod strojeva s cilindričkim rotorom s kosinusom otklona rotora δ. Kod svih strojeva možemo ga odrediti eksperimentalno, ako raspolažemo posebnim uređajima za mjerenje prostornog kuta otklona polnog kotača δ_{pr}. Sinhroni stroj opteretimo *dodatno* malom snagom, te mjerimo dodatni kut otklona prema početnom položaju. Tada je:

sinhronizacioni moment u praznom hodu, odnosno kod opterećenja =

$$\frac{\text{dodatno opterećenje u kW}}{\text{prostorna promjena otklona rotora u stupnjevima}} \cdot \frac{112000}{\text{sinhrona brzina vrtnje} \cdot \text{broj polova}},$$

$$\text{gdje je } 112000 = \frac{60\,000 \cdot 180}{9{,}81\,\pi^2}$$

Momentom ispadanja iz koraka nazivamo prekretni moment sinhronog stroja u sinhronom radu. Odnosi se na nominalni napon, nominalnu frekvenciju i nominalnu uzbudu. Veličina mu približno iznosi:

$$M_{prekr_{sin}} = M_n \cdot \frac{i}{i_k \cdot \cos\varphi} \quad \text{kod stroja s cilindričkim rotorom, odnosno}$$

$$= M_n \cdot \frac{i}{i_k \cdot \cos\varphi}\left(1 + \frac{i_0}{6\,i} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{3}{2}\left(\frac{i}{i_0}\right)^2}}\right) \quad \text{kod stroja s istaknutim polovima.}$$

Trajni rad. Ako je moguće, izvodimo pokus zagrijavanja sinhronog stroja pri nominalnom naponu, struji i uzbudi. Većinom nije važno, da li stroj radi kao motor ili kao generator. U mnogim slučajevima ne raspolažemo odgovarajućim pogonom ili opterećenjem, pa možemo pokus izvršiti samo uz $\cos\varphi \approx 0$, tako da stroj radi kao popravljač faze. Ako je nominalni faktor snage stroja manji od 0,9, možemo pokus bez daljnjega izvesti s punim naponom i punom strujom armature. Dobit ćemo praktički ispravne vrijednosti za ugrijanje statorskog željeza i namota armature. Zbog prevelike uzbudne struje ugrijanje uzbudnog namota će biti, naravno,

preveliko, ali ga možemo bez oklijevanja kvadratično preračunati na nominalnu jakost struje.

Kod stroja s faktorom snage većim od 0,9 osobito dakle kod sinhronog motora s $\cos \varphi = 1{,}0$, dobit ćemo prevelike uzbudne gubitke, ako ga tjeramo kao popravljač faze, što znatno utječe i na zagrijavanje armature. U takvim slučajevima radije pristupamo radu s nominalnom uzbudnom strujom, te reduciramo snagu stroja u kVA. To možemo postići sniženjem napona ili struje. Obično radimo s nominalnom strujom, a smanjimo napon na stezaljkama. U posebnim slučajevima uzimamo u obzir veličinu gubitaka u željezu i u bakru, te odaberemo onakav rad, koji se najviše približava faktičnim opterećenjima.

Temperaturu uzbudnog namota možemo trajno nadzirati, ako promatramo uzbudnu struju i uzbudni napon na kliznim kolutima. Kod izračunavanja otpora uzbudnog namota iz napona i struje dobivamo većinom 5 do 10^0 veća ugrijanja, nego što ih daje naknadno mjerenje otpora mostom.

Samo kod strojeva s osobito dugotrajnim zaustavljanjem bit će gdjekada potrebno da stvarno ugrijanje određujemo ekstrapolacijom unatrag krivulje hlađenja, koju smo dobili iz više mjerenja. Praktičke zahtjeve zadovoljava, ako kočenjem stroja dovoljno skratimo zaustavljanje, i odmah po završetku trajnog pogona obustavimo rashladni zrak. U tim slučajevima daje jednokratno mjerenje toplog otpora dovoljno točne rezultate.

Trajni rad u umjetnim spojevima, kod kojih pojimo namot spojen u otvoreni trokut istosmjernom ili izmjeničnom strujom, ne izvodi se u praksi ispitnih stanica. Ako nemamo prikladne mreže ili su pogonski strojevi premaleni, izvodimo često pokus zagrijavanja u kratkom spoju. Tada nam je potreban pogonski stroj, koji može pokriti pune gubitke, smanjene za iznos gubitaka u željezu i eventualno uzbudnih gubitaka. Kod velikih strojeva odgovara ta snaga tek vrlo malenom postotku pune snage. Pokus u kratkom spoju upotpunjavamo pokusom u praznom hodu, uz puni napon, te zbrojimo nadtemperature iz oba pokusa. Većinom dobivamo ugrijanja, koja su za 5^0 previsoka.

Korisnost. Korisnost sinhronog stroja određujemo gotovo isključivo metodom pojedinačnih gubitaka. Metode povratnog rada i preuzbude, opisane na str. 42, omogućuju doduše, da odredimo ukupne gubitke, no u praksi ih upotrebljavamo samo da bismo opteretili strojeve.

Gubici sinhronog stroja sastoje se od *užih gubitaka praznog hoda, teretnih gubitaka* i *uzbudnih gubitaka*. Dobivamo ih mjerenjima u praznom hodu i u kratkom spoju i izračunavanjem.

Uži gubici praznog hoda:

1. Gubici u željezu = $N_{ž}$ = gubici kod napona U_n u praznom hodu. Djelatne i induktivne padove napona prema propisima (REM) ne uzimamo u obzir. (Američki standardi ASA uzimaju u obzir djelatni pad napona.)

2. Gubici trenja = N_{tr} = gubici zbog trenja zraka i trenja u ležajima kod sinhrone brzine vrtnje u praznom hodu. Gubitke u ležajima tuđeg podrijetla ne uzimamo u obzir. Kod polaganih kompresorskih motora obično ne uvrštavamo gubitke trenja, što treba istaknuti kod korisnosti.

Gubici trenja i gubici u željezu nezavisni su dakle prema propisima (REM) o vrsti i stupnju opterećenja.

Teretni gubici:

1. Gubici u bakru armature = $N_{Cu_a} = 3 \cdot I_f^2 \cdot R_f = 1{,}5 \cdot I^2 \cdot R_{st}$, gdje je I mrežna struja, a R_{st} topli otpor između dviju stezaljki armature. Topli otpor odnosi se na 75° ili na temperaturu dobivenu mjerenjem.

2. Dodatni gubici = $N_{dod} = I^2 (N_{d_k} / I_k^2)$, gdje N_{d_k} znači dodatne gubitke u kratkom spoju uz struju kratkog spoja I_k.

3. Gubici prijelaza = $0{,}9 \cdot I$ kod četkica, koje sadrže metala, a $= 3 \cdot I$ kod grafitnih ili ugljenih četkica. Ove gubitke imamo samo kod malih strojeva, kod kojih armatura rotira.

Uzbudni gubici:

1. Gubici u bakru uzbude = $N_{uzb} = i_{uzb} \cdot R_{uzb} + N_{r,u}$, gdje prvi član znači čiste gubitke u toplom uzbudnom namotu, a drugi član gubitke u regulacionim otpornicima kao i u *prigrađenom* uzbudnom stroju. Gubitke u uzbudniku s *nezavisnim pogonom* ne uračunavamo.

2. Gubici prijelaza = $0{,}6 \cdot i_{uzb}$ odn. $2 \cdot i_{uzb}$ nastaju na kliznim kolutima. Općenito ih ne uzimamo u obzir.

Kod generatora polazimo od *predane električke djelatne snage*, kojoj pribrajamo sumu pojedinačnih gubitaka, da bismo odredili primljenu snagu. Ova se sastoji iz čisto mehaničke snage kod strojeva s vlastitom uzbudom, ili iz mehaničke snage plus snage uzbudnika kod generatora s nezavisnom uzbudom. Vrijedi:

$$N_1 = (N_{el_r} + N_ž + N_{tr} + N_{Cu_a} + N_{dod} + N_{uzb}) = (N_{el_r} + \Sigma N_g).$$

Odavle računamo korisnost:

$$\eta\,\% = 100 \cdot \frac{N_{el_r}}{N_1} = 100 \cdot \frac{N_{el_r}}{N_{el_r} + \Sigma N_g} = 100 - \frac{\Sigma N_g \cdot 100}{N_{el_r} + \Sigma N_g}.$$

Ova posljednja formula vrlo je prikladna za točno izračunavanje korisnosti vrlo velikih strojeva.

Kod *motora* polazimo od *primljene snage*, dakle kod strojeva s vlastitom uzbudom od djelatne snage, uzete iz mreže, a kod motora s nezavisnom uzbudom od sume snage iz mreže i snage uzbudnika. Općenito možemo odrediti korisnost za određeno motorsko opterećenje tek pošto smo kroz izračunate točke nacrtali krivulju korisnosti. Vrijedi:

$$N_1 - (N_{\check{z}} + N_{tr} + N_{Cu_a} + N_{dod} + N_{uzb}) = N_2 .$$

Odbijemo dakle sumu svih gubitaka od primljene snage, pa dobijemo mehaničku snagu predanu na osovini. Odavle izračunamo η:

$$\eta\,\% = 100 \cdot \frac{N_2}{N_1} = 100 \cdot \frac{N_1 - \Sigma N_g}{N_1} = 100 - \frac{\Sigma N_g \cdot 100}{N_1} .$$

Kod *popravljača faze* izračunavamo samo gubitke. Gdjekada navodimo gubitke u kW na 100 kVA ili gubitke u kW kao postotak jalove snage, koju stroj daje. Na taj način možemo najbolje uspoređivati rotirajuće popravljače faze s kondenzatorima, kod kojih isto tako navodimo gubitke na 100 kVA. Gubici su sastavljeni od:

$$N_g = (N_{\check{z}} + N_{tr} + N_{Cu_a} + N_{dod} + N_{uzb}) ,$$

te su jednaki dovedenoj snazi iz mreže plus eventualnoj zasebno dovedenoj snazi uzbudnika. Ma da neposredno mjerenje izgleda najjednostavnije, ipak odustajemo od toga, jer vrlo mali faktor snage od cca 0,02 do 0,05 uzrokuje relativno velike pogreške mjerenja.

Faktor snage odlučno utječe na korisnost generatora i motora, jer uz istu djelatnu snagu, kako gubici u armaturi i dodatni gubici, tako i uzbudni gubici jako rastu, kad $\cos\varphi$ pada. Uobičajeno je, da se korisnost navodi za $\cos\varphi = 1{,}0$ i za $\cos\varphi = 0{,}8$. Tek rijetko kada izračunavamo korisnost uz konstantnu uzbudu, dakle za $\cos\varphi$, koji se mijenja s opterećenjem. Kada govorimo o korisnosti bez pobližih podataka, razumijevamo pod tim vrijednost uz nominalni napon, struju i faktor snage.

Tolerancije. Za garantirane tehničke podatke sinhronih strojeva vrijede prema propisima (REM) ove tolerancije:

Garancija za:	Dopuštena odstupanja:
Korisnost $\eta\%$	$\pm \frac{100-\eta\%}{10}$, zaokruženo na 0,1%, no najmanje 0,5%. (To predstavlja 10% tolerancije kod gubitaka uz korisnost manju od 95%.)
Promjenu napona	± 20% garantirane vrijednosti. (Ova ne smije premašiti 50% uz $\cos\varphi = 0{,}8$.)
Udarnu struju kratkog spoja	± 20% propisane vrijednosti. (Ova ne smije premašiti 21-struku nominalnu struju.)
Trajnu struju kratkog spoja	± 15% propisane vrijednosti.

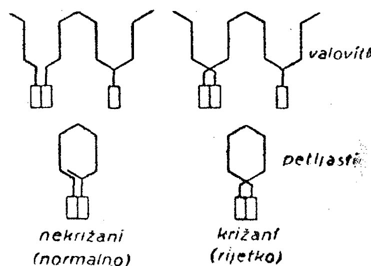
Zaletnu struju kod asinhronog zaleta . .	± 20% propisane vrijednosti.	
Prekretni moment (sinhroni)	± 10% propisane vrijednosti. (Prekretni moment sinhronih motora uz nominalnu uzbudu treba da bude jednak najmanje 1,5-strukom nominalnom momentu.)	
Potezni moment	± 10% propisane vrijednosti. (Minimalni zaletni moment, a time i potezni moment, ne smije biti manji od 0,3-strukog nominalnog momenta. Samo prema posebnom dogovoru smije potezni moment da bude manji.)	

D. ISTOSMJERNI STROJEVI

a) Općenito

Sastav. Istosmjerni strojevi sastavljeni su uglavnom od magnetskog dijela, koji se sastoji od glavnih polova, pomoćnih polova i jarma i od armature, koja se unutar ovoga okreće. Glavni polovi nose uzbudne namote,

Vrsta namota	(+) — četkica ispod	(—) četkica ispod	Smjer vrtnje
nekrižani	S-glavnog pola	N-glavnog pola	
križani	N-glavnog pola	S-glavnog pola	
nekrižani	N-glavnog pola	S-glavnog pola	
križani	S-glavnog pola	N-glavnog pola	



Sl. 116. Prostorni položaj četkica istosmjernih strojeva

koje može uzbuđivati struja odvojena iz samog stroja, nezavisna (strana) struja ili čitava struja armature. Kod samouzbude i nezavisne uzbude govorimo o porednim strojevima, kod uzbude isključivo čitavom strujom armature o serijskim strojevima. Motori i generatori s mješovitom uzbudom zovu se mješoviti ili kompaundni strojevi. Jaram je u velikoj većini slučajeva izrađen od lijevana čelika ili vâljana željeza. Polove, naprotiv, često izvodimo lamelirane. Kod kompenziranih strojeva nalazi se u polnim nastavcima smješten u utorima još jedan namot spojen u seriju. Os ovog namota stoji okomito na os glavnih polova. Svrha mu je, da zajedno s namotom pomoćnih polova poništi magnetizirajuće djelovanje armature, dakle da ga kompenzira.

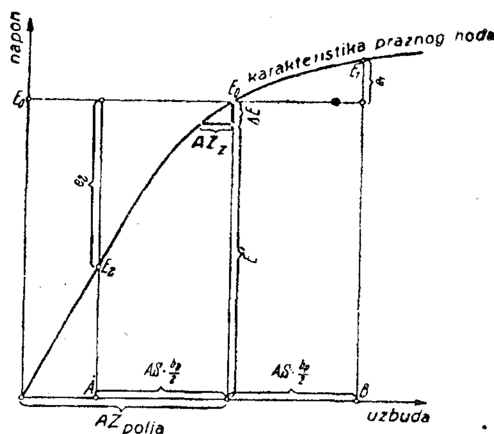
Pomoćne ili komutacione polove nalazimo danas kod svih istosmjernih strojeva sve dolje do snaga od svega nekoliko kilovata. Zadaća im je, da osiguraju besprijekornu komutaciju, a uzbuđuje ih struja armature. Ude-

šavanje ispravnog raspora pomoćnog pola spada u najvažnije zadaće ispitivanja istosmjernih strojeva.

Armatura nosi petljasti ili valoviti namot, koji je spojen na lamele kolektora. Kod strojeva za diobu napona namot je usto spojen još na dva ili više kliznih koluta.

Na kolektoru kližu četkice, kojih je polovina spojena na (+), a polovina na (—)-stezaljku stroja. Obično stoje četkice po sredini glavnih polova, a položaj (+)-četkice ispod N- ili S-pola zavisi o tome, da li je namot otvoren ili križani. To se može vidjeti na sl. 116. U shemama spoja četkice leže uvijek u magnetskoj osi armature, dakle pod pomoćnim polom uz pretpostavku, da je to nekrižani namot.

Spojna shema. Zbog raznovrsnih rasporeda uzbudnih namota na glavnim polovima za ispitivanje pojedinih istosmjernih strojeva neophodno je potrebna jednoznačna spojna shema. S ove sheme uzimamo smjer vrtnje, motorski ili generatorski rad, te djelovanje uzbudnih namota na glavnim polovima, koji se potpomažu ili djeluju jedan nasuprot drugome. Osim toga, shema sadrži oznake često mnogobrojnih stezaljki. Strelice naznačuju smjer struje i smjerove magnetskih polja, koji tome odgovaraju. Svici, u kojima je smjer strelica struje jednak, potpomažu se; svici sa suprotnim strelicama djeluju jedan drugome nasuprot. Smjer vrtnje je određen, ako je postavljena strelica glavnog polja i strelica armature. Kod motora treba smjer vrtnje označiti onako, kako bismo doveli strelicu armature najkraćim putem u smjer strelice polja. Kod generatora označujemo smjer vrtnje obratno, t. j. onako, kako bismo strelicu armature doveli dužim putem u smjer strelice polja. Strelice armature i pomoćnog pola moraju gledati uvijek jedna drugoj nasuprot. Budući da se kompenzacioni namot i namot pomoćnog pola potpomažu, slažu se i njihove strelice. Kompenzacioni namot, doduše, ne rišemo više odvojeno. Shemu i smjer vrtnje navodimo s obzirom na pogled s pogonske strane. Ako je že-



Sl. 117. Određivanje reakcije armature AZ_z zbog deformacije polja kod zasićenja vršaka na polnim nastavcima. $E_2 E_0 E_1$ predstavlja raspodjelu polja ispod pola kod opterećenja. SO = strujni oblog armature u A/cm. b_p = polni luk u cm. E_0 = EMS u praznom hodu; E' = EMS kod opterećenja; ΔE = pad zbog reakcije armature.

$$\Delta E = \frac{e_2 - e_1}{6}$$

AZ_z = djelatno slabljenje AZ polja zbog zasićenja; mijenja se od praznog hoda do cca 5/4 tereta s *kvadratom* opterećenja, preko toga otprilike linearno.

limo promatrati s obzirom na pogled s kolektorske strane, treba samo papir gledati sa stražnje strane. Sve strelice vrijede i dalje. Najvažnije sheme motora i generatora s pomoćnim polovima reproducirane su na sl. 135 do 146, koje dolaze kasnije.

Reakcija armature. Armatura istosmjernog stroja, kroz koju teče struja, utječe na glavne polove tako, da ih magnetizira ili razmagnetizira. Taj utjecaj zovemo reakcijom armature. Tri su različita uzroka ovoj reakciji, i to *zasićenje* prednjeg brida polnog nastavka kod motora, odnosno stražnjeg brida kod generatora, *pomak četkica* iz neutralnog položaja, i *pomak komutacione zone* od sredine četkice zbog *pomoćnih polova.*

Reakcija zbog pojave zasićenja nastupa samo u zakrivljenom dijelu krivulje zasićenja. Ona uvijek slabi polje, bez obzira na to, da li stroj radi kao motor ili kao generator. Izražavamo je onim brojem *AZ*, koje moramo dodati na glavnom polu, kad teče struja u armaturi, da bismo dobili istu EMS u namotu armature kao i kod praznog hoda. Označimo je sa AZ_z, pri čemu indeks *z* ukazuje na zavisnost o zasićenju. Na sl. 117 prikazano je, kako se ona određuje grafički. Lijevo i desno od *AZ* glavnog pola nanesemo dužinu, koja odgovara iznosu *AZ* armature pod lijevim i desnim bridom polnog nastavka, t. j. $SO \cdot b_p / \tau_p$. Ovdje znači *SO* strujni oblog armature u A/cm, b_p i τ_p širinu polnog luka i polni korak u cm, te AZ_a ukupne *AZ* armature pod pomoćnim polom, dakle vrijednost $SO \cdot \tau_p/2$.

Oslabljenu EMS *E'* dobivamo kao srednju visinu površine $E_1E_0E_2AB$. Možemo je naći planimetriranjem. Znatno jednostavnije, ali ipak vrlo točno, može se pad EMS odrediti po formuli izvedenoj iz Simpsonovog pravila:

$$\Delta E = E_0 - E' = \frac{e_2 - e_1}{6},$$

te se može odmah očitati pripadni broj AZ_z, koji slabe polje. Ovi AZ_z su uvijek negativni i mijenjaju se od praznog hoda do cca 1,25-strukog nominalnog opterećenja s *kvadratom* struje armature *I*. Potrebno je, prema tome, samo odrediti AZ_{z_n} za nominalnu struju, a kod bilo koje struje treba uzeti:

$$AZ_z = -AZ_{z_n} \cdot \left(\frac{I}{I_n}\right)^2.$$

Kod većih struja mijenjaju se AZ_z samo još linearno s jakošću struje. *AZ* su glavni uzrok, što veći istosmjerni motori postaju nestabilni, jer oni sve više slabe polje i povećavaju brzinu vrtnje motora, kad opterećenje raste.

Kompenzirani istosmjerni strojevi ne pokazuju primjetljive reakcije armature, uzrokovane zasićenjem, zato ih osobito rado upotrebljavamo kao velike strojeve.

Reakcija armature zbog pomaka četkica neka je označena sa $AZ_č$, izračunavamo je po relaciji:

$$AZ_č = k \cdot s \cdot \frac{D_a}{D_k} \cdot SO,$$

gdje znači: k = broj lamela za koji su četkice pomaknute,
s = širina lamele u cm,
D_a = promjer armature u cm,
D_k = promjer kolektora u cm,
SO = strujni oblog armature u A/cm.

$AZ_č$ mogu biti pozitivni ili negativni. Pozitivno, dakle u smislu jačanja polja, djeluje pomak četkica u smjeru vrtnje kolektora kod motora, a nasuprot smjeru vrtnje kod generatora. Negativno, dakle u smislu slabljenja glavnog polja, djeluju četkice, kad ih pomaknemo nasuprot smjeru vrtnje kod motora, a u smjeru vrtnje kod generatora. Ispravni predznak za $AZ_č$ dobivamo, ako uvrstimo k pozitivno kod pomaka u smjeru vrtnje, negativno kod suprotnog pomaka, i SO pozitivno kod motorske, negativno kod generatorske struje. SO se izračunava:

$$SO = \frac{z \cdot \frac{I}{2a}}{\pi \cdot D_a},$$

gdje je z = ukupni broj vodiča armature,
$2a$ = broj paralelnih grana,
I = struja armature u A, (+) kod motora, (—) kod generatora.

Pomak četkica uzrokuje, općenito izraženo:
kod pomaka u smjeru vrtnje povećanje stabilnosti,
kod suprotnog pomaka smanjenje stabilnosti.

To znači, da motori i generatori s naprijed pomaknutim četkicama smanjuju brzinu vrtnje odnosno napon kad opterećenje raste, dok uz natrag pomaknute četkice nastoje povećati brzinu vrtnje, odnosno napon kad opterećenje raste. Kod današnjih strojeva s pomoćnim polovima ne pomičemo više četkice zbog komutacije, ali to ipak često činimo zbog veće stabilnosti. Pomak četkica natrag ne primjenjujemo po mogućnosti nikada. Upotrebljavamo ga tek oprezno onda, kad je napon generatora odviše oskudan ili brzina vrtnje motora nije dosta obilna.

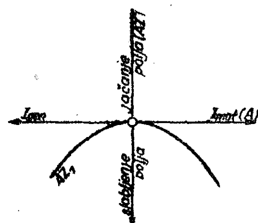
Reakcija armature zbog utjecaja pomoćnih polova u stvari je pomak komutacione zone ispod četkice *nasuprot* smjeru vrtnje kod prejakog, a *u* smjeru vrtnje kod *preslabog* komutacionog polja. Možemo je samo procijeniti, te nije ni u kakovoj jednostavnoj vezi s jakosti struje. Kod vrlo jakih komutacionih polja zbiva se komutacija gotovo već na prednjem bridu četkice, jer započinje preuranjeno. To dakle u krajnjem slu-

čaju odgovara pomaku četkica za pol širine ili za odgovarajući broj kolektorskih lamela. Kod vrlo slabih pomoćnih polova započinje komutacija s jakim zakašnjenjem, struja se mijenja tek u neposrednoj blizini stražnjeg brida četkice. To odgovara pomaku četkice za pol širine u smjeru vrtnje. U stvari, ispravno udešeni pomoćni polovi strojeva, koji treba da podnose znatnija preopterećenja, djeluju kod malih struja armature nešto prejako, kod velikih struja, naprotiv, preslabo. Uzrok je tome karakteristika pomoćnih polova, koja je, također zbog pojava zasićenja, zakrivljena. Jaki pomoćni polovi utječu zato u nekim slučajevima između praznog hoda i punog opterećenja na stabilnost motora i generatora, te ih u takvim slučajevima treba oslabiti odgovarajućim povećanjem njihovog raspora. Kod toga postavlja granicu nastup pogoršanja komutacije. Vrijedi:

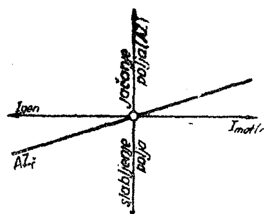
Prejaki pomoćni polovi djeluju kao natrag pomaknute četkice: smanjuju stabilnost.

Preslabi pomoćni polovi **djeluju kao naprijed pomaknute četkice: povećavaju stabilnost.**

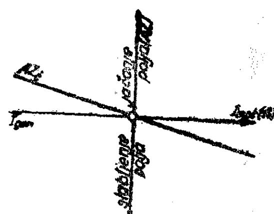
Jako utječe stanje klizne površine pod četkicama. Ako leži samo prednji brid, djeluje četkica kao natrag pomaknuta, a ako leži samo stražnji brid, djeluje kao naprijed pomaknuta. Četkice moramo zato prije svakog ispitivanja, a osobito prije stavljanja u pogon, besprijekorno **ubrusiti**.



Reakcija armature zbog deformacije polja kod zasićenja vršaka polnih nastavaka



Reakcija armature zbog pomaka četkica *naprijed*



Reakcija armature zbog pomaka četkica *natrag*

Sl. 118. Krivulje reakcije armature zbog deformacije polja kod zasićenja vršaka polnih nastavaka, odnosno zbog pomaka četkica, u zavisnosti o struji motora, odnosno generatora.

Ukupnu rekaciju armature, izazvanu pojavama zasićenja u bridovima polnih nastavaka i pomakom četkica, ali izuzevši utjecaj pomoćnih polova na polje, izračunavamo:

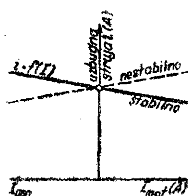
$$AZ_r = AZ_z + AZ_{\check{c}} = -AZ_{z_n} \cdot \left(\frac{I}{I_n}\right)^2 + I \cdot k \cdot s \cdot \frac{1}{\pi D_k} \cdot \frac{z}{2a}.$$

Krivulje komponenata AZ_z i $AZ_{\check{c}}$ u zavisnosti o struji, prikazane su na sl. 118. U literaturi rijetko nalazimo upozorenje na kvadratičnu zavisnost AZ_z izazvanih zasićenjem, no ova je osobito važna za stabilnost velikih nekompenziranih istosmjernih motora. Ove naime možemo gdjekada zbog te zavisnosti primjenom serijskih namota stabilizirati samo u uskom po-

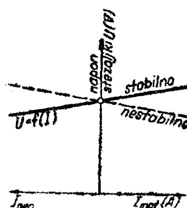
dručju rada, do jedva malo iznad nominalnog opterećenja, jer iznad toga slabljenje polja, koje se povećava kvadratično, nadvladava jačanje polja zbog serijskog namota, koje se povećava samo linearno.

Dijagram i karakteristike. Gdjekada ne možemo direktno snimiti karakteristike opterećenog istosmjernog stroja ili smo prisiljeni za vrijeme ispitivanja znatno utjecati na njih promjenama u uzbudnom krugu. Zato se razvio čitav niz grafičkih metoda, kojima je svima cilj, da iz poznate karakteristike praznog hoda $E_0 = f(i)$, odnosno $E_0 = f(AZ)$ odrede radne točke, točku po točku ili kao krivulju, da bismo ih usporedili s mjerenjem, ili gdjekada time nadomjestili mjerenje. Uz poznavanje prikladnih metoda lakše je također pronaći prave mjere, da se ispitivanim strojevima u ispitnoj stanici dadu zahtijevane karakteristike napona, brzine vrtnje ili regulacije. Osnovne karakteristike su ove:

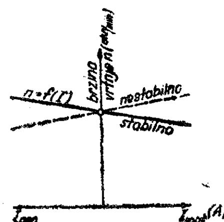
1. *Karakteristika regulacije kod motora i generatora.* Ova pokazuje međusobnu zavisnost struje armature i uzbudne struje uz nepromijenjene vrijednosti napona na stezaljkama i brzine vrtnje. Po njoj se razabire stabilno ili nestabilno ponašanje stroja. Kod motorskog rada smije, općenito, struja armature porasti, samo ako se smanji uzbudna struja, a struja generatora smije porasti, samo ako se uzbudna struja pojača. Gdje god dvije različite struje armature odgovaraju jednoj te istoj uzbudnoj struji, imamo gotovo uvijek nestabilno ponašanje. Sl. 119a pokazuje dobre i loše karakteristike regulacije.



a) Karakteristika regulacije U = konst., n = konst.



b) Karakteristika napona stezaljki i = konst., n = konst.



c) Karakteristika brzine vrtnje U = konst., i = konst.

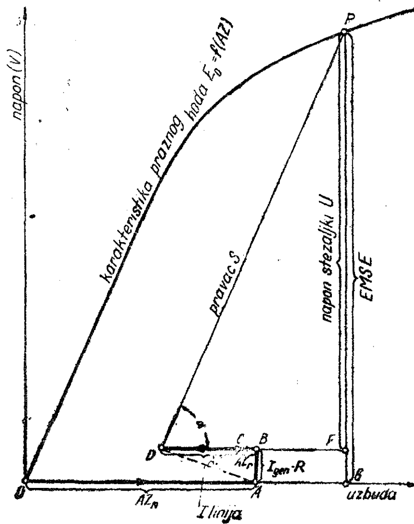
Sl. 119. Stabilne i nestabilne karakteristike regulacije, napona stezaljki i brzine vrtnje istosmjernih motora i generatora. Tvrdi strojevi imaju blago silazne, meki strojevi jako silazne karakteristike.

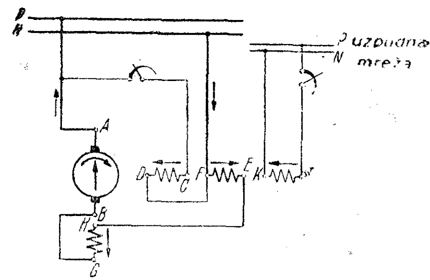
2. *Karakteristika napona na stezaljkama.* To je karakteristična krivulja za generatore. Pokazuje zavisnost napona potrošača, koji opterećeni generator daje na stezaljkama, o struji opterećenja kod nepromijenjene uzbude, odnosno otpora u uzbudnom krugu. Kad silazi vrlo blago, govorimo o tvrdom stroju, a kad se jako spušta, nazivamo generator mekanim. Meki strojevi dobro rade paralelno, tvrdi strojevi manje dobro. Ako

karakteristika napona na stezaljkama raste sa strujom opterećenja, ne možemo, općenito uzevši, smatrati stroj stabilnim, osim ako radi na duži vod sa znatnim padom napona. Karakteristika napona vrijedi za nepromijenjenu brzinu vrtnje (sl. 119b).

3. *Karakteristika brzine vrtnje.* Ova je krivulja karakteristična za motore, koji rade s nepromijenjenom uzbudom priključeni na mrežu konstantnog napona. Pokazuje nam brzinu motora u zavisnosti o struji armature ili o snazi. U pogledu krivulje vrijedi isto kao kod karakteristike napona na stezaljkama. Motori s blago silaznom karakteristikom tvrdi su, a one kod kojih brzina vrtnje jako pada, nazivamo mekanima. Čim brzina vrtnje kod povećanja opterećenja raste, označujemo motor kao nestabilan. Sl. 119c pokazuje tipične karakteristike brzine vrtnje za stabilne i nestabilne strojeve.

Na daljnjim stranicama razrađen je *općeniti dijagram* istosmjernog stroja, u kojem su sadržani dijagrami svih normalno građenih strojeva.





Spojna shema (Krämerov stroj)

Sl. 120 Dijagram istosmjernog stroja. Primjer Krämerovog stroja s nezavisnom uzbudom *IK*, samouzbudom *CD* i suprotno spojenom — protuserijskom — uzbudom *FE*. Redoslijed ova u dijagramu odgovara konstrukciji: $OA = AZ_n$ = nezavisna uzbuda, $AB = I_{gen}\ R$ = djelatni pad napona (kod generatorskog rada prema gore, kod motorskog rada $I_{mot}\ R$ prema dolje), $BC = AZ_r$ = reakcija armature (nalijevo, kad slabi polje, nadesno, kad jača polje), $CD = AZ_p$ = protuserijska uzbuda (nalijevo kad slabi polje, što odgovara protukompaundaciji, nadesno, kad jača polje, što odgovara kompaundaciji), pravac S = pravac samouzbude = pravac nagnut pod kutom α ($\alpha = 90^0$ uz otpor samouzbude ∞, ili kad nema samouzbudnog kruga, $\alpha > 90^0$ kod samorazbude). EMS E = okomita udaljenost točke P od nul-linije, napon na stezaljkama U = okomita udaljenost od pravca BD, crtkana linija AD = „I-linija", koja zavisi samo o struji. Podjelom ove prema strujama djelomičnog opterećenja $0{,}75\,I$, $0{,}50\,I$, $0{,}25\,I$, $0{,}0\,I$ i paralelnim pomicanjem pravca S kroz odgovarajuće točke, možemo proširiti dijagram za slučajeve tih opterećenja. Vidi sl. 122-125.

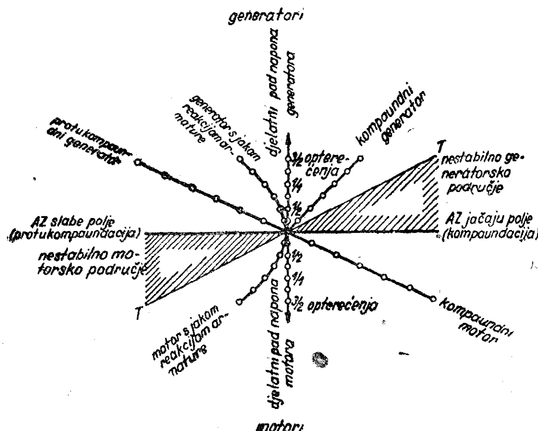
Napose možemo odavde izvesti dijagrame porednog, serijskog i kompaundnog motora i generatora, kao i Krämerovog stroja sa tri različita uzbudna namota. Potrebna je karakteristika praznog hoda, ukupni otpor u krugu armature — u kojemu neka je sadržan i prijelazni otpor četkica — i reakcija armature AZ_r kod nominalne struje. Isprva ćemo zbog jednostavnosti uzeti, da se pad napona i reakcija armature mijenjaju linearno sa strujom *I*, ma da to, kako je prije rečeno, nije sasvim točno. U slučajevima, gdje je utjecaj reakcije armature osobito velik, možemo je unijeti točku po točku u pravom iznosu, kao na pr. na sl. 142 i 143.

Na sl. 120 nacrtan je dijagram stroja, koji ima namote za nezavisnu uzbudu, samouzbudu i serijsku uzbudu. Ako zamislimo, da je otpao jedan ili dva od tih namota, dobivamo sve poznate vrste strojeva. Namot nezavisne uzbude djeluje uvijek u smislu jačanja polja, dok samouzbuda ili serijska uzbuda može jačati ili slabiti polje. Jakost uzbudnih namota predstavlja broj njihovih *AZ*. Nadesno naneseni *AZ* jačaju polje, nalijevo usmjereni ga slabe. Djelatni pad napona nanosimo od nul-linije, i to prema gore kod generatorskog, a prema dolje kod motorskog rada. Za samouzbudu općenito još ne možemo dati odgovarajuće *AZ*, jer ovi zavise o naponu na stezaljkama *U* kod opterećenja, koji obično treba tek odrediti. Da se prikaže jakost samouzbudnog kruga karakterističan je i dovoljan priklon pravca samouzbude, koji leži pod kutom α prema horizontalnoj nul-liniji. Ovaj je kut to manji, što je manji otpor u uzbudnom krugu. Ako povećavamo otpor, on raste. Pravac postaje vertikala, ako je krug otvoren ili ako ga uopće nema. Ako je pravac priklonjen pod kutom većim od 90°, imamo samorazbudu, t. j. samouzbudni namot je suprotno priključen. To se praktički primjenjuje samo kod spoja za razmagnetiziranje, koji upotrebljavamo, da bismo u posebnim slučajevima po mogućnosti uništili napon stroja proizveden remanencijom.

Konstrukcija dijagrama, koji vrijedi uvijek samo za brzinu vrtnje, kod koje smo snimili karakteristiku praznog hoda, je slijedeća. Prvo na nul-liniji odmjerimo dužinu AZ_n, koja odgovara amperzavojima nezavisne uzbude. Ovi su nezavisni o struji *I* i o naponu *U*. Zatim nanesemo okomito u mjerilu napona pad napona $I \cdot R$, kod generatora prema gore, kod motora prema dolje. Nalijevo nanosimo o struji zavisne *AZ* reakcije armature i eventualno suprotno spojenog serijskog namota, koji slabe polje, nadesno *AZ* reakcije armature, koji jačaju polje i *AZ* eventualno predviđenog serijskog namota. Ova jedna do tri dužine zavisne su samo o struji. Rezultirajuću liniju označimo kao »*I*-liniju«. Ona je vrijedno pomagalo kod konstrukcije specijalnih dijagrama. U krajnjoj točki povučemo pravac samouzbude *S* pod kutom α, koji gleda desno gore kod uzbude, lijevo gore kod razbude. Ako uopće nema samouzbude, on ide točno okomito prema gore.

Taj pravac siječe karakteristiku praznog hoda u točki P, koja neposredno daje vrijednost napona na stezaljkama.

Kut α pravca samouzbude odredimo tako, da za bilo koju vrijednost napona, priključenog na samouzbudni krug, izračunamo iz otpora struju, koju uzima, a iz ove množenjem s brojem zavoja po polu izračunamo AZ. Vodoravno nanesemo AZ, zatim nanesemo okomito napon i spojimo početnu i konačnu točku obiju dužina pravcem samouzbude, koji je na taj način određen. Kod spoja za razbudu treba AZ nanijeti nalijevo, dakle u smislu slabljenja polja. Koliki AZ samouzbude u stvari djeluju, znat ćemo tek, kad nađemo napon na stezaljkama U. Dobivamo ih sa dijagrama kao dužinu DF, koju odsijeca okomica kroz sjecište P s karakteristikom praznog hoda na horizontali kroz donju početnu točku pravca samouzbude. Ovi AZ samouzbude jedini zavise o naponu na stezaljkama U.



Sl. 121. »I-linije« istosmjernih strojeva. Povezuju za djelomična opterećenja ili puno opterećenje pripadne vrijednosti djelatnog pada napona u krugu armature i uzbudne AZ na glavnom polu, koje proizvodi struja armature I neposredno (serijski namoti) ili posredno (reakcija armature). Mjerila su ista kao i kod krivulje praznog hoda. Generatori i motori su nestabilni, ako »I-linija« pada unutar šrafiranog prostora. TT je paralelno s tangentom na karakteristiku praznog hoda u točki praznog hoda P_0.

Linije, koje vode od ishodišta 0 do točke P napona na stezaljkama, sastavljene su od: 1. stranih AZ, nezavisnih o struji I i naponu U, 2. pada napona $I{\cdot}R$, koji zavisi o struji, AZ reakcije armature i serijskih AZ, odnosno protuserijskih AZ, dakle »I-linije«, i 3. pravca samouzbude, kod kojega priklon zavisi samo o otporu samouzbudnog kruga.

Odmah razabiramo mjere, koje treba poduzeti, da bismo dobili drugi napon na stezaljkama U. Ako taj treba da bude veći od napona, što smo ga dobili, to treba pojačati nezavisnu uzbudu ili samouzbudu; ako treba da bude manji, to treba jednu od obje uzbude smanjiti. Mjere u vezi s padom napona $I \cdot R$ mogu ići samo za tim, da se on poveća, ali ih općenito ne smijemo primijeniti zbog neekonomičnosti. Ako se radi o malim promjenama napona, možemo često utjecati tako, da mijenjamo AZ reakcije armature pomicanjem četkica naprijed ili natrag. Serijske ili protuserijske AZ možemo oslabiti većinom samo tako, da paralelno namotu dodamo poredni otpornik. Ovaj međutim može, čak ako ga izvedemo kao kratki spoj, preuzeti obično samo 50 do 80% struje, jer je otpor serijskog namota i sam vrlo malen.

Napon na stezaljkama kod motorskog ili generatorskog rada predstavlja vertikalna komponenta pravca samouzbude, kao što je to na sl. 120 posebno označeno. Time smo uzeli u obzir $I \cdot R$. Naprotiv, EMS predstavlja okomica od točke P na E_0-krivulji do nul-linije, koja je, dakle, za $I \cdot R$ veća od napona na stezaljkama kod generatora, a za $I \cdot R$ manja kod motora.

Osim pojedinih točaka možemo iz izloženih dijagrama dobiti potpune karakteristike regulacije, napona i brzine vrtnje. Ove se doduše pojavljuju u kosom ili zakrivljenom koordinatnom sistemu, ali omogućuju da odmah, bez ikakva daljnjeg posla, upoznamo kvalitativno ponašanje stroja, osobito što se tiče stabilnosti ili nestabilnosti, kao i statičke granične opteretivosti, promjene brzine vrtnje i napona. Treba samo odrediti t. zv. »I-liniju« stroja za generatorski i motorski rad, koji promatramo, ili za oba zajedno. »I-liniju« prema onome, što je prije rečeno, dobivamo tako, da za različite jakosti struje armature I izračunamo sumu reakcije armature i serijskih AZ, odnosno protuserijskih AZ_s i iznad ove nanesemo pripadne vrijednosti $I \cdot R$. Ako smatramo, da su reakcija armature i pad napona na četkicama linearno zavisni o I, to je »I-linija« naravno manje ili više položiti pravac. Ovaj gleda prema gore kod generatora, prema dolje kod motora, nadesno, kad struja I jača polje, nalijevo, kad ga slabi. Ako uzmemo u obzir u stvari kvadratičnu zavisnost reakcije armature o struji, to je ona zakri-

Sl. 122. **Promjena uzbude i, napona stezaljki U i brzine vrtnje n u dijagramu istosmjernog stroja. (Primjer Krämerovog stroja).**

Promjena uzbude Δi = horizontalna (U = konst., n = konst.)	**udaljenost od točaka „I-linije", koje pripadaju dotičnim opterećenjima do karakteristike praznog hoda.**
Promjena napona ΔU = kosa paralelno s pravcem samouzbude (i odnosno r_{uzb} = konst., n konst)	
Promjena brzine vrtnje Δn = vertikalna (U = konst., i = konst.)	

Ako „I-linija" leži *iznad* / *ispod* karakteristike praznog hoda, vrijedi:

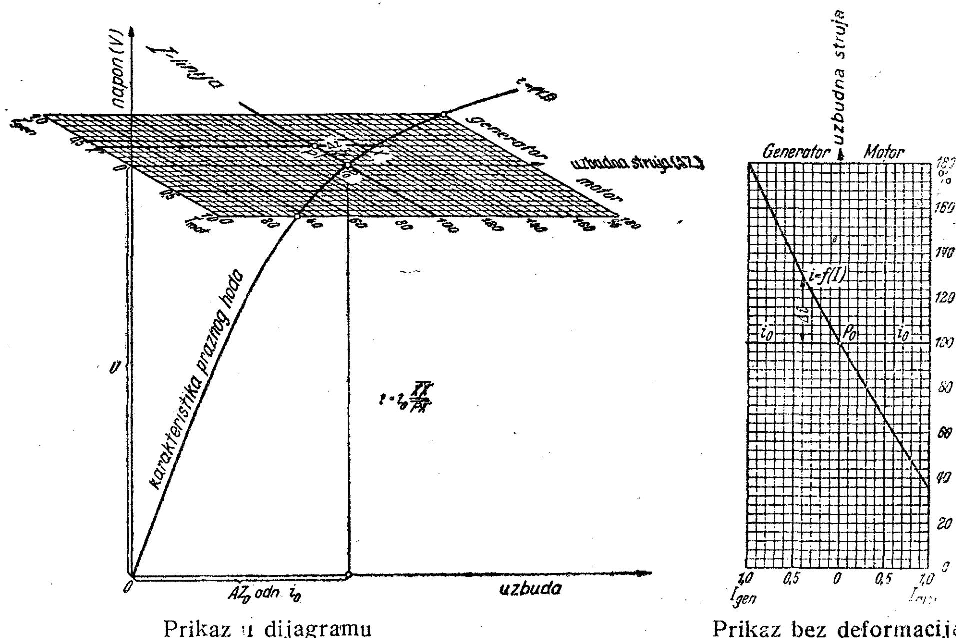
$$\Delta i = +\frac{PX}{OB} \cdot i_0, \qquad -\frac{PX}{OB} \cdot i_0$$

$$\Delta U = -\frac{PY}{P_0A} \cdot U_0, \qquad +\frac{PY}{P_0A} \cdot U_0$$

$$\Delta n = -\frac{PZ}{ZZ'} \cdot n_0, \qquad -\frac{PZ}{ZZ'} \cdot n_0$$

vljena. Vidimo da »I-linija« nije ništa drugo, nego krivulja mjesta krajnjih točaka dužina u dijagramu, koje zavise o struji. Sl. 121 prikazuje »I-linije« za različite slučajeve.

Veza između jakosti struje i promjena uzbudne struje, napona na stezaljkama ili brzine vrtnje prikazana je na sl. 122. »I-linija« je postavljena od točke P_0, koja odgovara naponu praznog hoda U_0, odnosno uzbudi praznog hoda AZ_0, a leži na karakteristici zasićenja, koja pripada brzini vrtnje u praznom hodu n_0. Pođemo li od točke P, koja leži na »I-liniji«,



Prikaz u dijagramu | Prikaz bez deformacije

Sl. 123. Određivanje karakteristike regulacije $i = f(I)$ iz krivulje praznog hoda i »I-linije«. Primjer protukompaundnog generatora ili kompaundnog motora. Konstrukcija: na nul-liniju nanijeti ukupnu uzbudu praznog hoda AZ_0, odnosno i_0. Na vertikali odmjeriti $U = U_0$. Kroz P_0 povući karakteristiku praznog hoda. Na P_0 nastaviti »I-liniju«. Horizontalne udaljenosti od ove do karakteristike praznog hoda daju potrebne promjene uzbude Δi. U nacrtanom kosokutnom koordinatnom sustavu prikazuje »I-linija« kroz P_0 vrijednosti $i = i_0 =$ konst., dok sama karakteristika praznog hoda prikazuje traženu karakteristiku regulacije. Ishodište sistema leži na ordinati kroz O, u istoj visini sa P_0. Mjerilo za I je u oba sistema isto.

a pripada promatranoj struji I, *horizontalno* do karakteristike zasićenja, dobivamo promjenu uzbude Δi, koja je potrebna, da bismo uz konstantni napon na stezaljkama U održali brzinu vrtnje $n = n_0$, ili uz konstantnu brzinu vrtnje n, da bismo održali napon na stezaljkama $U = U_0$.

Držimo li konstantnom uzbudu, odnosno otpor u samouzbudnom krugu, to *vertikalna* udaljenost od P do karakteristike zasićenja odgovara promjeni brzine vrtnje Δn, koja će nastupiti, ako napon na stezaljkama U ostane konstantan.

Ostanu li konstantni brzina vrtnje i uzbudna struja, odnosno otpor u samouzbudnom krugu, onda *kosa* udaljenost od P do karakteristike za-

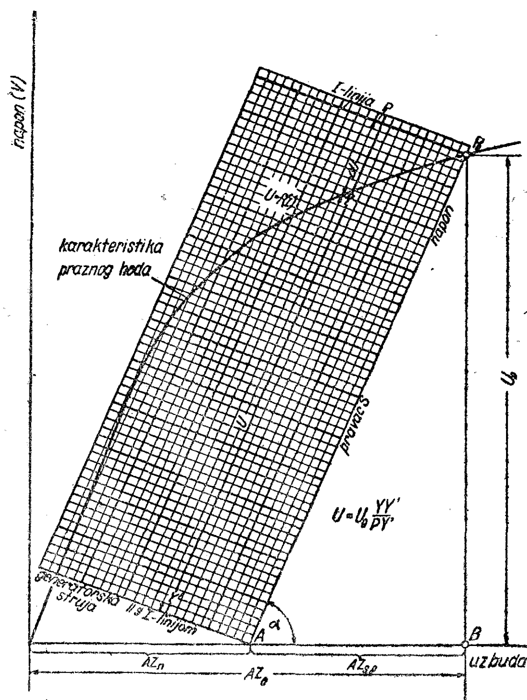
sićenja, paralelna s pravcem samouzbude, daje promjenu napona na stezaljkama ΔU. Kod strojeva bez samouzbude treba naravno uzeti vertikalnu udaljenost. Dobivamo (vidi i sl. 123, 124, 125):

$$\Delta i = \frac{PX}{OB} \cdot i_0, \quad \text{te} \quad i = \frac{XX'}{PX'} \cdot i_0,$$

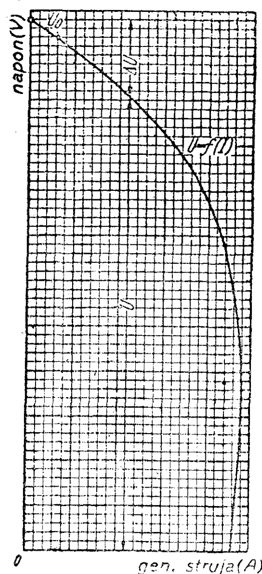
$$\Delta U = \frac{PY}{P_0 A} \cdot U_0 \qquad U = \frac{YY'}{PY'} \cdot U_0,$$

$$\Delta n = \frac{PZ}{ZZ'} \cdot n_0 \qquad n = \frac{PZ'}{ZZ'} \cdot n_0.$$

Pozitivno Δi znači povećanje uzbude, pozitivno ΔU povećanje napona i pozitivno Δn povećanje brzine vrtnje. Pozitivni ili negativni predznak zavisi o tome, da li »*I*-linija« prolazi iznad ili ispod karakteristike zasićenja. Dakle:



Prikaz u dijagramu



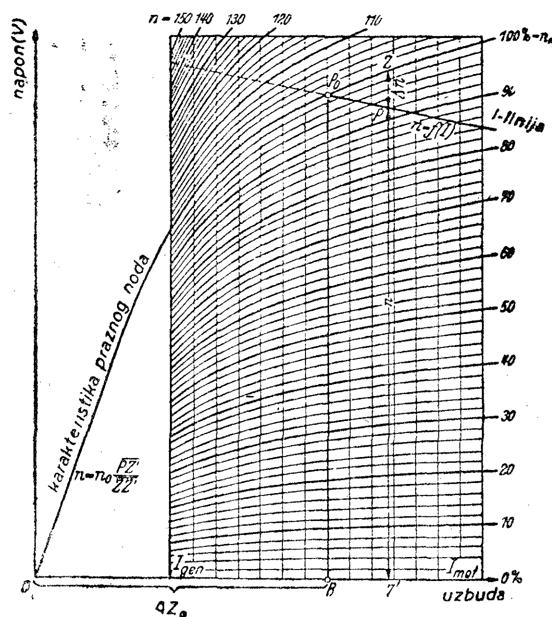
Prikaz bez deformacije

Sl. 124. Određivanje karakteristike napona stezaljki $U = f(I)$ iz krivulje praznog hoda i »*I*-linije«. Primjer Krämerovog stroja. Konstrukcija: Na nul-liniju nanijeti ukupnu uzbudu praznog hoda AZ_0. Na vertikali odmjeriti U_0. Kroz P_0 povući karakteristiku praznog hoda. Na P_0 nastaviti »*I*-liniju«. Kose udaljenosti od ove — paralelno s pravcem samouzbude — do karakteristike praznog hoda daju promjene napona ΔU.

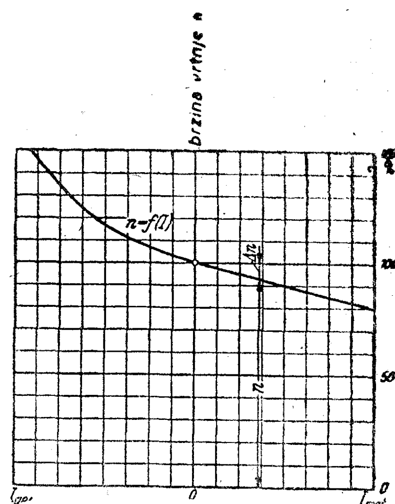
U nacrtanom kosokutnom koordinatnom sustavu prikazuje »*I*-linija« kroz P_0 vrijednosti $U = U_0 =$ konst., dok sama karakteristika praznog hoda predočuje traženu karakteristiku napona na stezaljkama. Ishodište sistema leži na apscisi dijagrama, te je od njegovog ishodišta udaljeno za onaj dio uzbude praznog hoda, koji otpada na nezavisnu uzbudu. Mjerilo za U jednako je mjerilu za napon u dijagramu pomnoženom sa sinusom kuta samouzbude α.

ako »I-linija prolazi	iznad	ispod	karakteristike zasićenja
Δi	+	—	
ΔU	—	+	
Δn	+	—	

Karakteristiku regulacije $i = f(I)$ određujemo prema sl. 123, karakteristiku napona na stezaljkama $U = f(I)$ prema sl. 124, i karakteristiku brzine vrtnje $n = f(I)$ prema sl. 125. Zbog zornosti unesen je u tim slikama



Prikaz u dijagramu



Prikaz bez deformacije

Sl 125. Određivanje karakteristike brzine vrtnje $n = f(I)$ iz karakteristike praznog hoda i »I-linije«. Primjer jako kompaundiranog motora uključivši i generatorsko područje. Konstrukcija: Na nul-liniju nanijeti ukupnu uzbudu praznog hoda AZ_0. Na vertikali odmjeriti U_0. Kroz P_0 povući karakteristiku praznog hoda za brzinu vrtnje $n_0 = 100\%$. (Kod motora bez uzbude u praznom hodu, dakle serijskih strojeva, treba U_0 nanijeti na ordinatu u ishodištu i povući bilo koju karakteristiku praznog hoda.) Na P_0 nastaviti »I-liniju«. Vertikalne udaljenosti od ove do karakteristike praznog hoda daju promjene brzine vrtnje Δn.

U nacrtanom koordinatnom sustavu predočuje karakteristika praznog hoda vrijednosti $n = n_0 =$ konst., a »I-linija« predočuje traženu karakteristiku brzine vrtnje. Ishodište sistema leži vertikalno ispod P_0 na nul-liniji dijagrama. Mjerilo za n je promjenljivo i to tako, da ordinata prvobitno reproducirane karakteristike praznog hoda svaki put predočuje brzinu vrtnje $n_0 = 100\%$.

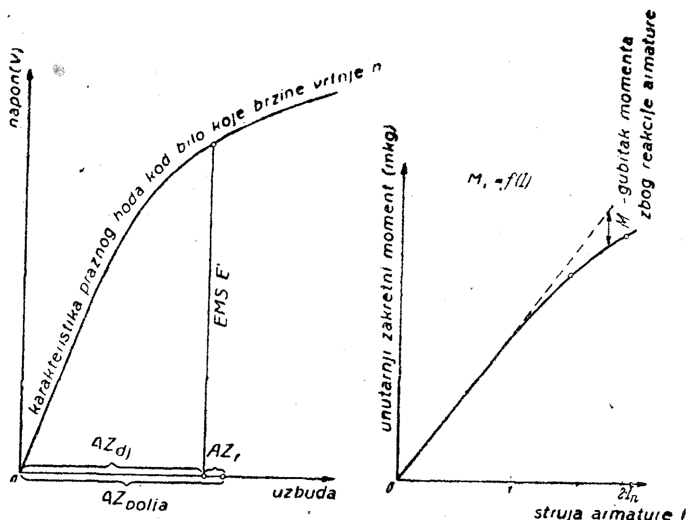
koordinatni sistem, koji je reproduciran također i bez deformacije. Razabiramo, da su obje prve karakteristike odsječak karakteristike zasićenja, dok posljednju predstavlja »I-linija«. Najvažnije karakteristike odredit ćemo i reproducirati još jednom kod pojedinih strojeva.

Zakretni moment. Zakretni moment, koji djeluje na istosmjerni stroj ili ga ovaj daje, računamo općenito iz snage na osovini i brzine vrtnje, kao i kod drugih strojeva:

$$M = \frac{N_{os}}{n} \cdot 973,$$

gdje je N_{os} u kW, n brzina vrtnje u okr/min, a $973 = \frac{1000 \cdot 60}{2\pi \cdot 9{,}81}$.

Često međutim želimo odrediti samo iz uzbudne struje i struje armature motorski ili generatorski moment, koji stroj razvija. Ovaj se razlikuje od momenta na osovini samo za moment gubitaka, koji pokriva gu-



a) $M_i = \frac{E'}{n'} \cdot \frac{I}{1{,}03}$ u mkg.

b) Zakretni moment $= f$ (struje armature).

Sl. 126. Određivanje unutarnjeg zakretnog momenta istosmjernog stroja iz karakteristike praznog hoda nacrtane za *bilo koju* **brzinu vrtnje** n' **i iz djelatne uzbude** AZ_{dj}, **koja rezultira iz stvarne uzbude** AZ_{polja} **i reakcije armature** AZ_r **(a). Pokraj toga prikaz krivulje** $M_i = f\,(I)$ **uz** $i =$ **konst. (b).**

bitke trenja i gubitke u željezu. Taj većinom iznosi samo nekoliko procenata nominalnog momenta, i može se često prema ovome zanemariti; no možemo ga u određenim slučajevima i uzeti u obzir. Odredit ćemo ovdje samo unutarnji moment, koji se izračunava:

$$M_i = \frac{E \cdot I}{1000} \cdot \frac{973}{n} = \left(\frac{E}{n}\right) \cdot \frac{I}{1{,}03},$$

gdje je E EMS koja odgovara poznatoj uzbudi i reakciji armature kod brzine vrtnje n.

Odredimo dakle za struju I i za uzbudne AZ pripadnu EMS, i izračunamo moment. To je teško kod vrlo malih brzina vrtnje, dakle osobito u slučajevima, gdje stroj reguliramo daleko prema dolje uz punu uzbudu regulacijom napona. Formula će potpuno zatajiti, kad stroj stoji, jer treba odrediti kvocijent $\frac{0}{0}$. Primjenjujemo tada slijedeću doskočicu. Odredimo EMS ne za stvarnu, dakle gdjekada vrlo malu ili sasvim iščezavajuću, nego za punu brzinu vrtnje. To tumači sl. 126a. Ova EMS neka je E', odgovarajuća brzina vrtnje n'. Zatim modificiramo navedenu formulu:

$$M_i = \frac{E' \cdot I}{1000} \cdot \frac{973}{n} \cdot \frac{n}{n'} = \frac{E'}{n'} \cdot \frac{I}{1,03} \quad \text{u mkg.}$$

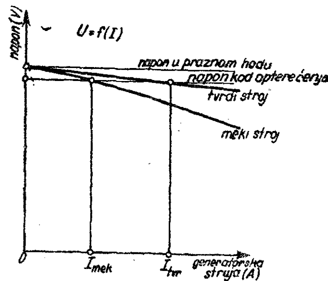
Ne računamo dakle uopće više sa stvarnom brzinom vrtnje n, već sa proizvoljnom n', ali uvrštavamo veću EMS E' umjesto stvarne E. Često nas zanima, kako se mijenja zakretni moment u zavisnosti o struji armature I. Za male i srednje do cca dvostruke nominalne struje teče ta karakteristika kao ravna linija. Iznad toga opažamo kod strojeva s velikim strujnim oblogom, kod kojih reakcija armature jako slabi polje, kako krivulja skreće, tako da strujama armature, koje dalje rastu, pripadaju zakretni momenti, koji se samo malo povećavaju. Na sl. 126b prikazana je krivulja momenta *normalnog nezavisno uzbuđenog porednog motora, s četkicama u neutralnom položaju*. Reakcija armature određena je iz karakteristike praznog hoda po metodi prikazanoj na str. 196.

Stvarni moment na osovini dobivamo, ako uzmemo u obzir momente, koji odgovaraju gubicima u željezu i gubicima trenja kod promatranih brzina vrtnje, a koje treba kod generatora dodati, a kod motora odbiti.

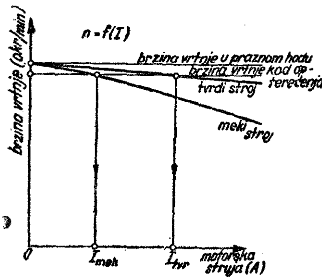
Paralelni rad i podjela opterećenja. Nagib karakteristike $U = f(I)$ kod generatora i $n = f(I)$ kod motora odlučno utječe na sposobnost istosmjernog stroja, da stabilno radi paralelno s drugim strojevima. Kod generatora treba pod $U = f(I)$ razumjeti stvarnu karakteristiku stroja u upotrebi, koja zavisi ne samo o ponašanju samog stroja, nego i o karakteristici brzine vrtnje njegovog pogona. Pogonski stroj, koji kod opterećenja smanjuje brzinu, čini karakteristiku napona generatora mekanom.

Generatori i motori mogu, općenito uzevši, samo onda paralelno raditi, ako njihove karakteristike padaju. Zajedničko opterećenje podijeli se, kao što se vidi sa sl. 127a, b, proporcionalno prema tvrdoći stroja. Tvrdi stroj, dakle onaj, čija je karakteristika manje nagnuta, preuzima veći dio; mekši je stroj tek slabo opterećen. Preuzete snage — izražene kao dio nominalne snage pojedinog stroja — bit će jednake samo u slučaju, kad se procentualne karakteristike podudaraju, t. j. kad je kod istog procentualnog opterećenja pad napona ili brzine vrtnje isti. Ako samo jedan generator radi na veliku mrežu, možemo ovu smatrati kao drugi generator s krutom karakteristikom napona. Zato stroj, priključen u praznom hodu na

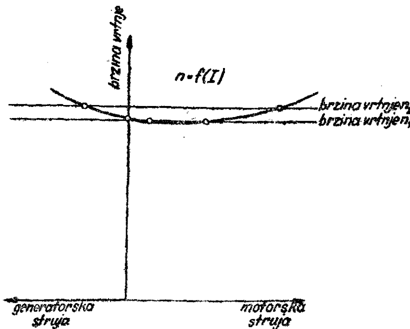
mrežu, ne će uopće sudjelovati kod snabdijevanja novo pridošlih potrošača. Sudjelovati će tek onda, kad njegovu karakteristiku napona povećavanjem uzbudne struje pomaknemo paralelno prema gore. Stupanj pomaka odgovara stupnju opterećenja. Motori, opterećeni potrošačem mehaničkog rada s konstantnom brzinom vrtnje, ponašaju se kao da su mehanički paralelno spojeni s beskonačno velikim strojem. To je slučaj kod pogona



a) Paralelni rad mekog i tvrdog generatora. Posljednji preuzima veće opterećenje.



b) Paralelni rad mekog i tvrdog motora. Posljednji preuzima veće opterećenje.



c) Paralelni rad dvaju jednakih motora s nestabilnom granom karakteristike. Svakoj brzini vrtnje odgovaraju dvije različite struje, od kojih jedna može čak biti generatorska (povratni rad!).

Sl. 127a-c. Razdioba opterećenja kod istosmjernih strojeva u paralelnom radu

sinhronih generatora. Istosmjerni motor tek onda počne vući, kad oslabimo njegovu uzbudu i na taj način njegovu karakteristiku brzine vrtnje pomaknemo prema gore. Stupnju pomaka odgovara stupanj, u kojemu će motor preuzeti davanje snage.

Kod stroja s karakteristikom, koja pada, pa onda raste, kakvu nalazimo u prvom redu kod motora, ne možemo više očekivati jednoznačnu podjelu

opterećenja. Sl. 127c pokazuje, da dva motora s potpuno jednakom karakteristikom, ako ih spojimo i tako postignemo istu brzinu vrtnje, ipak mogu preuzeti različita opterećenja. Kod takve karakteristike postoji čak velika opasnost, da jedan stroj postane generator, a drugi motor, te da se međusobno u povratnom radu opterećuju velikim strujama. Ovakvo ponašanje pokazuju katkada motori za oba smjera vrtnje, regulirani slabljenjem polja, kod kojih postoji prirodna sklonost, da budu nestabilni, a četkice ne smijemo pomaknuti naprijed, jer bi kod drugog smjera vrtnje bile onda natrag pomaknute. Tada često pomaže slabljenje komutacionog polja.

Kompaundni generatori sa serijskim namotom, koji izaziva uspon karakteristike napona, ne mogu bez daljnjega raditi paralelno na zajedničku mrežu. (Na veliku mrežu, koju sačinjavaju veliki strojevi, ne mogu sami uopće raditi, jer bi uvijek preuzeli preveliko opterećenje). Moramo ih paralelno spojiti vodom za izjednačenje. To međutim pomaže samo onda, ako strojevi sami po sebi imaju padajuće karakteristike do točke, u kojoj je priključen vod za izjednačenje. Može se to, ako treba, postići tako, da se četkice pomaknu naprijed. Isto vrijedi za motore sa suprotno spojenim serijskim namotom na polovima, koji treba da izazove neko povećanje brzine vrtnje kod opterećenja. S vodom za izjednačenje možemo i kod ovih postići besprijekoran paralelni rad, ako im karakteristika bez protuserijskog namota pada. Paralelni rad će biti vrlo siguran, ako između armature i početka protuserijskog namota uključimo slabiji serijski namot. S pomoću ovoga dobivamo kod oba motora »unutarnju« karakteristiku, koja sigurno pada i koja omogućuje paralelni rad, dok izvana djeluje stvarna uzlazna karakteristika zbog pomaka krivulje, koji zavisi o opterećenju. Ova razmatranja su važna kod paralelnih agregata za izjednačenje, opisanih na str. 245, gdje su kruto spojeni kompaundni generatori i protukompaundni motori.

Komutacija. Pod komutacijom razumijevamo samu pojavu promjene smjera struje u svitku, koji je četkica kratko spojila, kao i sve popratne pojave, napose dakle stvaranje iskara između četkica i kolektora. Struja grane armature, koja teče u svitku iznosi $+I_{gr}$, prije no što ovaj dođe do četkice, a $-I_{gr}$ pošto napusti četkicu, gdje je $I_{gr} = I/2a$. U vremenu komutacije T_k, koje prođe od dostizanja do napuštanja četkice, teče u svitku, koji komutira struja kratkog spoja i_k. Ova se dakle mora mijenjati od $+ I_{gr}$ do $-I_{gr}$. Kad bi uglavnom samo prijelazni otpor između četkice i kolektora utjecao na pojavu, kao što se događa na pr. kod osobito male brzine stroja, bio bi vremenski tok struje kratkog spoja i_k praktički pravocrtan. Opadanje struje, dakle njezina promjena, bila bi tada konstantna. U stvari međutim prati promjenu struje pojava napona e_r, koji po svom

karakteru nastoji usporiti promjenu. Zove se napon reaktancije. Označimo li sa L_s rezultirajući rasipni induktivitet svih vodiča armature, koji za vrijeme komutacije međusobno utječu, to induktivni napon iznosi:

$$e_r = -L_s \cdot \frac{di_k}{dt},$$

gdje predznak (—) upozorava na djelovanje napona reaktancije u smislu sprečavanja komutacije. Na komutaciju, koja se odvija s vremenom po zakonu pravca prema sl. 128c, a kakvu bismo baš željeli, utječe to tako, da struja kratkog spoja i_k prvo opada tek polako, dok pod kraj vremena kratkog spoja ubrzano teži konačnoj vrijednosti $-I_{gr}$. Posljedica je toga nepovoljna raspodjela struje po presjeku četkice, koja se očituje u maloj gustoći struje pod prednjim, i povećanoj gustoći struje pod stražnjim bridom četkice. No upravo povećano opterećenje stražnjeg brida predstavlja težak uvjet za besprijekornu komutaciju. Zato pokušavamo štetni napon reaktancije e_r po mogućnosti poništiti naponom e_{pom} koji neko vanjsko magnetsko polje inducira rotacijom u svitku, koji komutira. Poželjno je čak, da taj napon bude nešto veći od napona reaktancije e_r, da bi komutacija, prema sl. 128d, tekla u početku nešto ubrzano. Na taj način dobivamo rasterećenje stražnjeg brida. Iznos napona reaktancije e_r nije vremenski konstantan, ali se to više podudara sa svojom vremenskom srednjom vrijednosti, što bliži je tok struje i_k pravcu. Tu srednju vrijednost možemo odrediti, jer ona zavisi, ako pretpostavimo konstantnu vrijednost rasipnog induktiviteta L_s samo o ukupnoj promjeni struje i_k u vremenu kratkog spoja T_k. Ukupna promjena struje je, prema gore rečenom, jednaka:

$$(+I_{gr}) - (-I_{gr}) = 2\,I_{gr}.$$

Apsolutna vrijednost srednjeg napona reaktancije je odavle:

$$\text{srednji napon reaktancije } e_r = L_s \cdot \frac{2\,I_{gr}}{T_k}.$$

Taj iznosi nekoliko volta. Uz nekoliko preinaka dobivamo praktički važnu Pichelmayerovu formulu:

$$e_r = H \cdot 2 l_ž \cdot w_s \cdot v_a \cdot SO \cdot 10^{-6},$$

gdje znači: H Hobartov rasipni faktor, koji uzima u obzir vodljive vrijednosti rasipa, $l_ž$ čistu dužinu željeza u cm, w_s broj zavoja po segmentu, v_a obodnu brzinu armature u m/sek i SO strujni oblog u A/cm. H se kreće u širokom području snage i brzine vrtnje između 4 i 8, i može se, kako ćemo dalje vidjeti, odrediti kod normalnog ispitivanja.

Vanjsko polje, koje u kratko spojenom svitku inducira napon komutacije e_{pom}, zove se *komutaciono polje* stroja. Proizvode ga pomoćni polovi. Veličinu komutacionog napona izračunavamo:

$$\text{komutacioni napon } e_{pom} = 2 \cdot l_ž \cdot w_s \cdot v_a \cdot B_{pom} \cdot 10^{-6},$$

gdje je B_{pom} magnetska indukcija ispod pomoćnog pola.

Da bi se oba napona e_r i e_{pom} međusobno poništila, mora vrijediti, koju god brzinu armature imali, osnovna relacija:

$$B_{pom} = H \cdot SO,$$

što odmah dobivamo iz obje gore navedene formule. Gustoća silnica komutacionog polja direktno je povezana Hobartovim rasipnim faktorom sa strujnim oblogom armature, a ne zavisi ni o kojoj drugoj veličini. Odavle slijedi da uzbudu komutacionog polja treba povećati u istoj mjeri, u kojoj se povećava sama struja armature kod povećanog opterećenja. Kod *strojeva s pomoćnim polovima* zbiva se to automatski, jer kroz njihove uzbudne namote teče sama struja armature. Potrebni broj zavoja za namot pomoćnog pola dobivamo slijedećim razmatranjem: Prvo, treba da je najmanje toliko velik kao djelotvorni broj zavoja armature w_a, što otpada na jedan pol, da bi se poništilo polje armature, i da se ne bi inducirao napon u kratko spojenom svitku armature. Drugo, treba da ima povrh toga još toliko zavoja, da proizvedu pod nastavkom pomoćnog pola potrebnu magnetsku indukciju B_{pom}. Odnos broja zavoja pomoćnog pola prema djelotvornom broju zavoja armature po polu označujemo kao relativnu kompenzaciju *k*. Ova iznosi većinom od 1,2 do 1,35, no može u iznimnim slučajevima porasti i do 1,8. *k* je povezano sa Hobartovim rasipnim faktorom *H*, brojem pari polova *p*, rasporom ispod pomoćnog pola δ_{pom} i promjerom stroja *D* prema relaciji:

$$k = \frac{\text{broj zavoja pomoćnog pola}}{\text{djelotvorni broj zavoja armature po polu}} = 1 + \frac{H \cdot \delta_{pom} \cdot p}{D}.$$

Iz te jednadžbe možemo odrediti *H* za stroj, koji besprijekorno komutira:

$$H = (k - 1) \cdot \frac{D}{\delta_{pom} \cdot p}.$$

U broj zavoja pomoćnog pola treba uračunati i broj zavoja eventualno izvedenog kompenzacionog namota. Djelotvorni broj zavoja armature po polu jednak je:

$$z : (2 \cdot 2a \cdot 2p).$$

Kako komutaciono polje treba da djeluje nasuprot polju armature, dobivamo ovaj redoslijed polova:

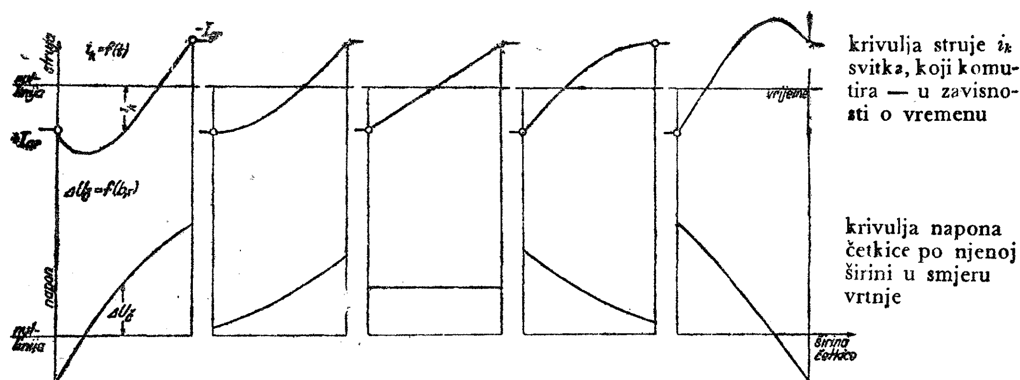
——— smjer vrtnje armature ———→

N-glavni pol — S-pomoćni pol — S-glavni pol — N-pomoćni pol (generator)
N-glavni pol — N-pomoćni pol — S-glavni pol — S-pomoćni pol (motor).

Kod *strojeva bez pomoćnih polova*, koji se danas grade samo još za najmanje snage, možemo iskoristiti kao komutaciono polje jedino ukupno

polje stroja, sastavljeno od glavnog polja i polja armature. Ono nije proporcionalno vezano sa strujom armature. Četkice treba pomaknuti iz neutralnog položaja, da bismo dospjeli u područje potrebne magnetske indukcije. Kod motora potreban je kod opterećenja, koje raste, sve veći pomak nasuprot smjeru vrtnje armature, kod generatora, naprotiv, u smjeru vrtnje.

Kako se mijenja struja i_k u kratko spojenom svitku možemo eksperimentalno tek vrlo teško neposredno odrediti, i to oscilografskim snimanjem pada napona u jednom vodiču armature. Zbog nesavršenog oduzimanja struje preko kliznih koluta, koji su kod toga potrebni, mogu nastati znatne pogreške. Indirektno se može zaključivati o mijenjanju struje, ili bar kvalitativno prosuditi njegov karakter, mjerenjem t. zv. *krivulje na-*



Krivulja struje i_k svitka, koji komutira — u zavisnosti o vremenu

a)	b)	c)	d)	e)
a) jaka potakomutacija	b) potkomutacija (smanjiti raspor ispod pomoćnog pola)	c) linearna komutacija (normalno kod preopterećenja)	d) natkomutacija (normalna krivulja leži između c i d)	e) jaka natkomutacija (povećati raspor ispod pomoćnog pola)

Sl. 128. Krivulja struje i_k svitka, koji komutira — u zavisnosti o vremenu —, i **krivulja** napona četkice po njenoj širini u smjeru vrtnje.

pona četkice. Kako je spomenuto, kod usporene komutacije, koju označujemo kao potkomutaciju, gustoća struje u četkici raste prema stražnjem bridu. Pad napona između četkice i kolektora, koji odgovara gustoći struje, mora dakle prema stražnjem bridu također rasti (sl. 128b).

Linearna komutacija uzrokuje jednoliku raspodjelu struje po četkici. Pad napona uzduž četkice je stoga konstantan (sl. 128c).

Kod ubrzane komutacije, koju zovemo natkomutacijom, gustoća struje je najveća na prednjem bridu. Zato je tamo najveći i pad napona, koji prema stražnjem bridu opada (sl. 128d).

U slučajevima vrlo jake potkomutacije struja i_k u početku kratkog spoja premašuje čak vrijednost struje grane I_{gr}. To izaziva obrat struje

na prednjem bridu četkice, i znatno povećanu gustoću struje na stražnjem bridu. Protivno od toga dešava se kod stroja s pretjerano jakim pomoćnim polovima. Struja kratkog spoja i_k odmah u početku vrlo naglo spadne, pojuri preko krajnje vrijednosti $-I_{gr}$, koju bi trebala doseći, i mora zato pod konac komutacije opet opadati. Posljedica je toga vrlo velika gustoća struje na prednjem bridu, i obrnuti smjer struje na stražnjem bridu četkice. Pad napona pokazuje zbog toga u prvom slučaju na prednjem bridu, a u drugom slučaju na stražnjem bridu krivi polaritet.

Krivuljom napona četkice nazivamo krivulju, koja prikazuje prostornu raspodjelu pada napona četkica-kolektor po širini četkice *u smjeru vrtnje*. Snimamo je prilikom električkog ispitivanja komutacije, a omogućuje nam da zaključujemo o gustoći struje u četkici, i preko toga o krivulji struje kratkog spoja i_k. Zbog promjenljiva prijelaznog otpora između četkice i kolektora ne postoji jednostavna veza, po uzoru Ohmovog zakona, između pada napona i gustoće struje. No padu napona, koji se povećava, pripada gustoća struje, koja također raste, a padu napona nula i gustoća nula. Veliku, malu i obratno usmjerenu gustoću struje, kao i eventualno područje bez struje, možemo zato sa sigurnošću *raspoznati*. *Uz stanovito približenje stvarnim,* vrlo zamršenim odnosima komutacije možemo reći, da i_k kao funkciju vremena dobivamo tako, da integriramo krivulju napona četkice, a na apscisu nanesemo vrijeme kratkog spoja T_k mjesto širine četkice. Slike 128a-c sadrže pregledno raspoređene tipične krivulje za tri spomenuta slučaja potkomutacije, linearne i natkomutacije, i kao upotpunjenje, za oba iznimna slučaja ekstremne potkomutacije i natkomutacije. Uvijek treba paziti, da krivulje nanosimo i mjerimo u smjeru vrtnje kolektora. Nanosimo ih uvijek tako, da srednja vrijednost, koja slijedi iz pojedinih mjerenja leži prema gore. Napose, ako se pokaže, da su padovi na prednjem i na stražnjem bridu različitog predznaka, treba uzeti kao pozitivan onaj pad, koji je po apsolutnom iznosu veći (vidi i sl. 129).

Praktičko ispitivanje komutacije. Komutaciju istosmjernog stroja ispitujemo kod nominalne brzine vrtnje i nominalne struje. Osim toga, često je promatramo kod struje veće od nominalne. Kod manjih i srednjih strojeva vršimo ispitivanje kod nominalnog napona. Kod većih strojeva, gdje uređaji ispitne stanice katkada ne dotječu u pogledu snage, izvodimo pokuse u kratkom spoju. Osobito kod valjaoničkih i transportnih strojeva možemo tek rijetko kada pod normalnim okolnostima raditi s traženim maksimalnim strujama. Ispitivanje u kratkom spoju kod strojeva s pomoćnim polovima ekvivalentno je ispitivanju kod punog napona. Brzina vrtnje mora, naravno, da bude nominalna.

Već samo posmatranje neposredno pokazuje, da li je komutacija besprijekorna ili nije. Stroj komutira dobro, kad ne možemo opaziti bilo kakve

iskre, kako na prednjem, tako ni na stražnjem bridu. Ako se tek kod pokusa s povećanom strujom pojavljuju male iskre, koje ne mogu izazvati trajno oštećenje kolektora, komutacija je besprijekorna i u području preopterećenja.

Ako se pak kod nominalne i kod povećane struje neprestano pokazuju iskre, osobito one praskava zvuka, treba poduzeti prikladne protumjere. Uzroci mogu biti čisto mehaničke i čisto električke naravi. U prve spada kolektor, koji nije okrugao, loši držači četkica s prelabavim ili pretijesnim dosjedom četkica, prevelik ili premalen pritisak četkica, nejednaki korak četkica, loše prilagođene ili uopće neprikladne četkice, tinjac, koji strši između lamela, i nejednaka mjesta lemljenja spojeva za izjednačenje. U električke uzroke spada prije svega pogrešni smisao namatanja namota pomoćnih polova, te prejako ili preslabo komutaciono polje.

Mehaničko ispitivanje komutacije. Određivanje pravog uzroka loše komutacije spada u ona ispitivanja na istosmjernom stroju, koja zahtijevaju mnogo vremena. Prije svega treba ispitati i ukloniti grube mehaničke uzroke, osobito ako već imamo dobrih iskustava sa strojem istog tipa. Kako nejednaki korak četkica uzrokuje jake smetnje, treba ga provjeriti najprije. To radimo s uskom trakom papira, koju ovijemo oko čitava kolektora, tako da leži ispod četkica. Oštro zašiljenom olovkom zarišemo po jedan brid četkice na svakom svorniku, te izmjerimo udaljenost pojedinih crta, pošto smo traku izvadili. Razlike u koraku četkica, veće od 1 mm, smatramo već nedopustivima, i treba da ih odstranimo.

Dalje ispitujemo dosjed četkica u držaču, pri čemu zračnost ne treba da bude manja ili veća od 0,2 do 0,4 mm. Od jakog razvijanja topline zbog loše komutacije, može četkica nabujati i uz premalenu zračnost može se zaglaviti. To još dalje pogoršava komutaciju.

Propisani pritisak, kojim četkica priliježe na kolektor, a koji treba da bude 150 do 250 g/cm², možemo ispitati grubo rukom, a točno malom vagom na pero. Njenom kukom povučemo četkicu dok se upravo ne podigne, te nakon toga pritisak korigiramo. To je osobito lako izvesti kod mnogih držača s udesivim perom. Također treba obratiti pažnju na kliznu plohu četkice, te se pobrinuti da bude u besprijekornom stanju, ako je potrebno, posebnim brušenjem. Isto možemo postići i ako pustimo stroj da radi duže vremena s malom strujom. Svornici za držače četkica treba da su stabilno građeni i treba ih zaštititi od titranja, eventualno tako, da spojimo slobodne krajeve prstenastom pločom od izolacionog materijala. Koso smještene svornike prepoznajemo po koso urezanom rubu kolektorskih lamela i rubu četkica; treba ih točno izravnati.

Površina kolektora ne smije biti hrapava. Ako je ohrapavimo, poboljšat ćemo doduše komutaciju u taj čas, ali će se kasnije neprilike još pove-

ćati. Najbolje je da kolektor prije ispitivanja dobro izbrusimo. Kolektor, koji nije okrugao, uzrokuje osobite poteškoće, zbog lošeg hoda četkica. Promatranje četkica i dodirivanje štapićem od izolacionog materijala, pokazuje, da li vibriraju. Stupanj neokruglosti mjerimo na više mjesta mjernom urom, prislonjenom na kolektor sa podjelom skale na 1/100 mm. Ako zapazimo odstupanja, pretokarimo nanovo kolektor, pri čemu ne treba zaboraviti, da centriranje na oba kraja osovine ne odgovara uvijek položaju osovine u ležajima. Često međutim nije moguće izvesti tokarenje u vlastitim ležajima.

Ostaci tinjca, koji strše, a možemo ih raspoznati tek kod točnog razgledavanja, utječu jako na mirni hod četkica. Tinjac treba ½ do 1 mm duboko izgrepsti i brid lamele blago ostrugati.

Kolektor može biti u hladnom stanju okrugao, te se tek kod zagrijavanja izbaciti. On se doduše više puta zagrijava i priteže već prilikom pomne fabrikacije, no ipak treba u odgovarajućem slučaju taj postupak ponoviti, osobito ako poslije dužeg rada nastupe poteškoće.

Mazanjem kolektora tek rijetko postizavamo trajno besprijekoran rad. Samo dok još nije nastala prva dobra, plavkasto obojena politura, možemo gdjekada namazati na topli kolektor nešto parafina za mazanje. Maziva, koja sadrže metala, treba izbjegavati.

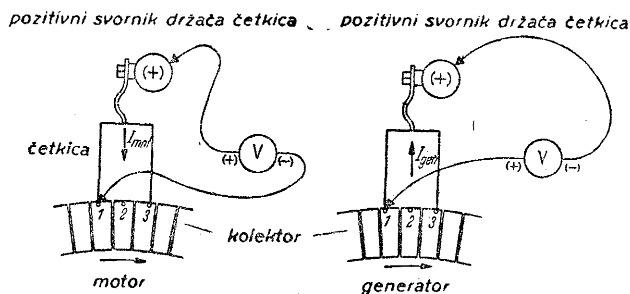
Vrlo je teško prepoznati nejednaka mjesta lemljenja ili druge griješke u spojevima izjednačenja ili u spojnim zastavicama između namota i kolektora kao uzrok loše komutacije. Prekidi u namotu armature, naprotiv, brzo se sami odaju jakim pocrnjivanjem dotičnih lamela. Nesimetriju u otporima prstena za izjednačenje možemo gdjekada ustanoviti po malo tamnije obojenim pojedinim lamelama u pravilnim razmacima po obodu kolektora. Pomoći možemo brižnim kontroliranjem svih lemljenih spojeva i ponovnim lemljenjem.

Kod izbora prikladnih vrsta četkica upućeni smo isključivo na iskustvo. Često treba ocijeniti prednosti bolje komutacije usporedivši ih s nepoželjnim povećanim trošenjem četkica ili kolektora i njegovim većim zagrijavanjem. Normalno će se međutim uvijek naći prikladna vrsta, koja će jamčiti trajno besprijekoran rad istosmjernog stroja, ako ovaj nema drugih griješaka.

Razumije se samo po sebi, da kolektor, zaprljan ugljenom prašinom, radi pod otežanim uvjetima. Laganim brisanjem za vrijeme rada u aksijalnom smjeru, počinjući od namota, može se ukloniti iz kolektorskih utora suha prašina, koja nastaje osobito kod izglađivanja kolektora i prilagođivanja četkica.

Električko ispitivanje komutacije. Najbolje je da mehaničke uzroke loše komutacije uklonimo prije električkih, jer možemo naići na poteškoće i uz najpovoljnije udešen raspor pomoćnog pola.

Električko ispitivanje sastoji se ponajprije od *mjerenja krivulje napona četkice*, što ga vršimo prema sl. 129. Instrument sa zakretnim svitkom za otklon u oba smjera do cca 3 V spojimo jednom stezaljkom na svornik nosača četkica, a drugom stezaljkom preko pomoćne četkice ili preko bakrenog šiljka na kolektor uzduž četkice. Prvo prislonimo šiljak tik do prednjeg brida, onda uz sredinu četkice i napokon do stražnjeg brida, ali tako, da ne dotičemo samu četkicu. Na voltmetru očitamo tri napona, te možemo po njihovoj veličini i bez crtanja prosuditi, kako teče krivulja potencijala. Ako su sva tri napona istog predznaka i ako opadaju, no ne odviše, prema stražnjem bridu (dakle u smjeru vrtnje), onda imamo nešto



Sl. 129. Mjerenje krivulje napona četkice. (Kod motora treba spojiti svornik i stezaljku instrumenta istog polariteta, kod generatora protivnog. Točke mjerenja uzimati uvijek u smjeru vrtnje.)

malo natkomutacije. To je kod punog opterećenja poželjno, jer onda kod preopterećenja, kad započne zasićenje pomoćnog pola, možemo očekivati linearnu komutaciju. Ako naponi jako opadaju, osobito ako je posljednji iznos negativan, stroj je jako natkompenziran. Raspor pomoćnog pola je premalen. Ako krivulja potencijala uzlazi, imamo potkomutaciju, i raspor pomoćnog pola treba smanjiti. Sl. 128a-e pokazuju tipični tok tih krivulja i protumjere, koje treba poduzeti.

Raspor mijenjamo gdjekada od oka, no bolje je to činiti na temelju daljnjeg mjerenja. Kod strojeva s natkomutacijom odvojimo, prema sl. 130a, jedan dio struje armature od namota pomoćnih polova na taj način, što spojimo paralelno prikladni niskoomski otpornik. Odvojena struja I_p može praktički iznositi 1 do 10% struje armature, t. j. poredni otpornik treba dimenzionirati za 10-erostruki vlastiti otpor namota pomoćnih polova. Sistematskim pokusima odredimo iznos odvojene struje, kod kojega nestaju iskre, kao i praktički svako sitno svjetlucanje ispod četkica. Odredimo najmanju vrijednost te struje, kod koje upravo započinje bolja komutacija, i najveću vrijednost, kod koje opet prestaje. Srednju vrijednost uzimamo kao osnovu za određivanje novog raspora pomoćnog pola.

Potrebnu promjenu raspora dobivamo iz razmatranja, prema kojemu se djelotvorni *AZ* pomoćnog pola za vrijeme pokusa odnose prema postojećem rasporu kao *AZ*, koje imamo bez porednog otpornika prema novom rasporu. Vrijedi dakle:

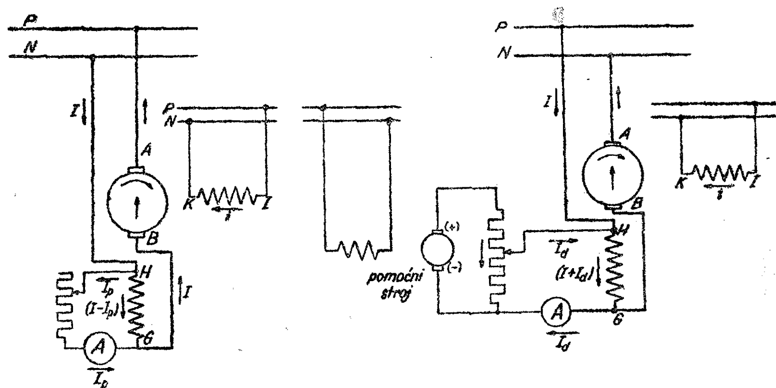
prije promjene nakon promjene

$$\frac{(I - I_p)\ w_{pom} - I \cdot w_a}{\delta_{prije}} = \frac{I \cdot (w_{pom} - w_a)}{\delta_{novi}} .$$

Odavle dobivamo konačni proračun:

$$\delta_{novi} = \delta_{prije} \cdot \frac{1}{1 - \frac{I_p}{I} \cdot \left(\frac{k}{k-1}\right)},$$ gdje je $k = \frac{w_{pom}}{w_a}$ = **relativna kompenzacija.**

Uz valjano približenje praktičkim slučajevima, možemo reći, da raspor treba povećati za 4% na svakih 1% odvojene struje. To vrijedi točno kod relativne kompenzacije 1,33.



a) Smanjivanje struje u namotu pomoćnih polova za iznos I_p kod natkomutacije

b) Povećanje struje u namotu pomoćnih polova za iznos I_d kod potkomutacije

Sl. 130. Smanjivanje i povećanje struje u namotu pomoćnih polova kod ispitivanja komutacije.

U slučaju stroja s potkomutacijom treba pokus izvršiti tako, da namotu pomoćnih polova dovodimo struju veću od struje armature. Sl. 130b prikazuje spoj, koji je zato potreban. Pomoćni stroj ili mrežu priključimo na otpornik. Zatim odredimo pad napona i polaritet namota pomoćnih polova. S otpornika oduzmemo isto toliki napon i spojimo točke istog polariteta. U početku ne pokazuje uključeni ampermetar struju, dakle je dodatna struja nula. Zatim pomičemo priključak na otporniku u smislu većeg pada napona i dovodimo na taj način namotu pomoćnih polova dodatnu struju I . Povećavamo je, dok ne započne dobra komutacija. Osim toga odredimo najveću dodatnu struju, kod koje komutacija opet postaje loša. Na temelju srednje vrijednosti određujemo promjenu raspora. Vrijede ista

razmatranja kao gore, samo treba namjesto I_p uvrstiti I, tako da je novi raspor:

$$\delta_{novi} = \delta_{prije} \cdot \frac{1}{1 + \frac{I_d}{I} \cdot \left(\frac{k}{k-1}\right)}.$$

Raspor treba dakle smanjiti, i to prosječno za 4% na svaki 1% dodane struje. Kod izvođenja pokusa treba paziti, da ne bismo spojevima stroja i otpornika kratko spojili koji dio napona mreže. To ćemo izbjeći, ako upotrebimo vlastiti pomoćni stroj.

Kod velikih istosmjernih strojeva za osobito velike struje i razmjerno male napone katkada se promjenom komutacionog polja još ne može postići tražena besprijekorna komutacija. Uzrok poteškoćama može gdjekada biti malo prekrivanje četkica. Iz mehaničkih razloga ne možemo ih odabrati po volji široke. Praktički vrijedi kao gornja granica širina u smjeru opsega od cca 25 mm. S druge strane zbog malog broja vodiča armature, podjela kolektora je gruba i lamele dosežu širinu do 25 mm. Prekrivanje četkica pada dakle u ovakvim slučajevima na 1,0. No kako je prema iskustvu za dobru komutaciju potrebno prekrivanje četkica od 1,3 do 1,8 lamela, to moramo povećati efektivnu širinu, na kojoj leže četkice, na taj način, da ih razmaknemo po obodu. To ne smijemo opet toliko pretjerati, da bi vodiči, koji komutiraju, dospjeli u područje silnica glavnog pola. Najbolju vrijednost možemo naći tako, da pokušavamo mijenjati stupanj razmicanja. Treba uvažiti, da proširenje komutacione zone smanjuje srednji napon reaktancije, i zbog toga jače utječu pomoćni polovi.

Preveliko prekrivanje četkica izaziva također lošu komutaciju, ako naime zbog toga vodiči kratko spojenog svitka dospiju u glavno polje. Tu pomažu uže četkice.

Uže četkice pomažu također, ako su nastavci pomoćnih polova preuski i vodiči, koji komutiraju, ne leže više, doduše, u području glavnog polja, ali se ne nalaze potpuno ni unutar komutacionog polja.

Prekrivanje četkica od točno cijelog broja lamela, dakle na pr. 2,0 ili 3,0 lamele nije poželjno, i to zato, što najmanja pogreška u koraku četkica uzrokuje, da jedna četkica ne pokriva u istom času isti broj lamela kao susjedna. U takvim slučajevima često ćemo postići znatno poboljšanje, ako stroj snabdijemo najbližom širom ili užom veličinom. Dobar dosjed preuske četkice u preširokom držaču osiguramo ulošcima.

Katkada se služimo naknadnim kosim postavljanjem držača, da bismo poboljšali mehanički hod četkica. Ne treba zaboraviti, da se kod toga proširi ploha, na kojoj četkica leži, i to za cca 4% kod kuta od 15°, a cca 15% kod 30°.

Rijedak je, ali vrlo neugodan izvor smetnja upotreba magnetičkih bandaža na paketu mjesto onih iz nemagnetskog materijala. Posljedica je znatno povećanje napona reaktancije, koji osim toga, zbog pojava zasićenja, nije više proporcionalan sa strujom. Upotrebljeni materijal možemo kontrolirati malim permanentnim magnetom. Magnetske bandaže na glavi namota same po sebi ne utječu nepovoljno na komutaciju. One uvjetuju, točno kao i željezni nosači glave namota, jače komutaciono polje.

Kod strojeva s dva kolektora, od kojih je svaki priključen na svoj namot armature, postizavamo gdjekada bolju komutaciju, ako oba kolektorska jarma međusobno malo zakrenemo. Na taj smo način izbjegli, da svici u istom utoru u isto vrijeme komutiraju. No gdjekada možemo time pokvariti jednoliku raspodjelu struje na oba namota, ako su ovi spojeni paralelno.

Zamjena tvrdog ugljena mekim ili upotreba grafitnih vrsta, umjesto normalnih kvaliteta, može u nekim slučajevima vrlo povoljno utjecati na komutaciju, no tu može odlučiti samo pokus i, prije svega, iskustvo.

Pokus praznog hoda. Nakon mjerenja otpora armature i uzbudnog namota slijedi snimanje karakteristike zasićenja $E_0 = f(i)$ kod nominalne brzine vrtnje stroja. Ispitivani stroj potjeramo, te ga nezavisno uzbudimo. To vrijedi napose kod serijskih strojeva i kod onih s više uzbudnih namota. Zbog razmjerno neznatnog utjecaja rasipa polova sporedno je, koji od postojećih uzbudnih namota upotrebljavamo. Zgodnije je odabrati jedan od namota s tankom žicom. Uzbudnu struju stalno povećavamo počevši od nule i reguliramo je do maksimalne vrijednosti, koja je određena nominalnim uzbudnim naponom i hladnim otporom uzbudnog kruga. Regulaciju u obrnutom smislu izbjegavamo za vrijeme pokusa, jer bismo dobili točke, koje ne leže sve na uzlaznoj grani krivulje zasićenja. Samo kod posebnih ispitivanja nadovezujemo još i snimanje silazne grane karakteristike.

Ako nema na raspolaganju pogonskog stroja, treba izvoditi pokus praznog hoda u motorskom radu kod različitih napona. Serijske strojeve možemo, naravno, tjerati samo s nezavisnom uzbudom, no najbolje je da to primijenimo i kod ostalih strojeva. Na taj način dobivamo odvojeno uzbudnu struju i struju armature. Točke krivulje zasićenja dobivamo i tako, da kod konstantnog napona U mijenjamo uzbudnu struju i i očitavamo brzinu vrtnje. Gubitke očitamo samo kod nominalne brzine vrtnje, jer ih kod drugih zasićenja ne možemo bez daljnjega preračunavati zbog promijenjene brzine. Kao EMS motora uzimamo napon mreže smanjen za iznos pada napona na četkicama od 2 V, a neznatni djelatni pad napona u armaturi i reakciju armature opravdano zanemarujemo. Napone praznog hoda

E_{01}, E_{02}, E_{03}..., koji kod nominalne brzine vrtnje odgovaraju pojedinim strujama i_1, i_2, i_3..., izračunavamo:

$$E_{01} = n_n \cdot \frac{U-2}{n_1},$$

$$E_{02} = n_n \cdot \frac{U-2}{n_2} \quad \text{i t. d.}$$

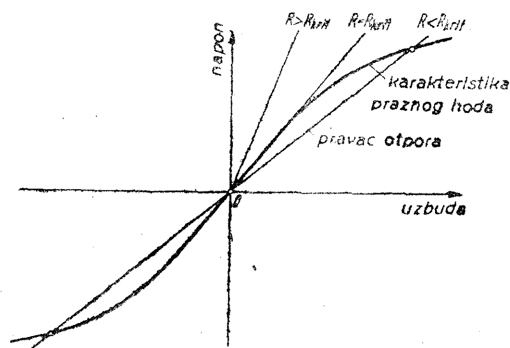
gdje su n_1, n_2, n_3... brzine vrtnje, koje dobivamo kod uzbudnih struja i_1, i_2, i_3..., a 2 predstavlja pad napona na četkicama. Zbog mehaničkih naprezanja smijemo, općenito, povećati brzinu vrtnje samo 25 do 30% iznad nominalne. S druge strane, zbog početka zasićenja uspijeva nam smanjiti brzinu najdalje do 80% nominalne brzine vrtnje. Točnost, koju možemo postići kod ovog pokusa, manja je od one kod generatorskog rada. No pokus možemo općenito izvesti bez posebnih sredstava, i zato ga rado primjenjujemo kod mjerenja izvan ispitne stanice.

Gubici u praznom hodu sastoje se od gubitaka u željezu i gubitaka trenja, dakle t. zv. užih gubitaka praznog hoda, koje upotrebljavamo kod određivanja korisnosti, te kod motorskog postupka od vrlo malih gubitaka u bakru armature, koje uvijek možemo zanemariti. Uz ove posljednje pridolaze još i gubici prijelaza na četkicama, koje možemo uzeti $2 \cdot I_0$. Kod malih napona postaju ovi već zamjetljivi, jer iznose kod napona U_0 $200\%/U_0$ gubitaka praznog hoda. 2,0 je vrijednost pada napona na četkicama također i kod malih struja armature. Podjela gubitaka na toplinu u željezu i toplinu trenja može se izvršiti grafičkom metodom navedenom na str. 15 ili metodom zaustavljanja, opisanom na str. 37, koja se, istina, u praksi ispitnih stanica tek vrlo rijetko primjenjuje.

Strojeve sa samouzbudom ispitujemo nakon toga u pravom njihovom spoju s pripadnim regulatorom. Cilj je ispitivanja da ustanovimo, da li se stroj uopće sam uzbuđuje, da li dobivamo traženi polaritet četkica i da li možemo regulirati u čitavom traženom području.

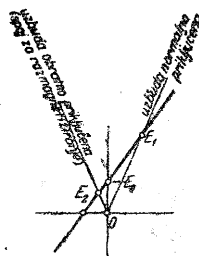
Uvjet samouzbude ispunjen je samo onda, kad je otpor uzbudnog kruga manji od t. zv. *kritičnog otpora*. Tako nazivamo onu vrijednost, kod koje pripadni pravac otpora, koji smo naprijed također označivali kao pravac samouzbude dodiruje krivulju zasićenja u njezinu ravnom, nezasićenom dijelu. Kod većih otpora ne dolazi uopće do uzbude, kod manjih pak vrijednosti uzbuđuje se stroj do vrijednosti određene sjecištem krivulje zasićenja i pravca otpora. To prikazuje sl. 131a. Krivulja zasićenja je produžena kroz ishodište u treći kvadrant. Vidimo, da polaritet kod samouzbude, općenito uzevši, može biti bilo koji. On nipošto nije jednoznačno određen spojem, već zavisi samo o remanenciji. Bez ove ne dolazi uopće do samouzbude. Tek kad se krivulja zasićenja zbog male remanencije pomakne lijevo ili desno, kao što to pokazuje sl. 131b, koja povećano prika-

zuje neposrednu okolicu ishodišta, pojavi se na stezaljkama armature mali napon, ma da je uzbudna struja u prvom času još nula. Ovaj napon potjera kroz uzbudni namot malu struju, koja opet poveća polje i time napon armature. Uzbudni namot nipošto ne smijemo priključiti obrnuto, dakle tako da napon remanencije u armaturi šalje kroz njega uzbudnu struju, koja djeluje nasuprot remanentnom toku. Ovakav spoj nazivamo spojem za razmagnetiziranje, a primjenjuje se samo tamo, gdje napon remanencije i svaku samouzbudu želimo smanjiti, odnosno spriječiti. Kod spoja za razmagnetiziranje stoji pravac otpora onako, kako se to vidi na sl. 131b.



a) (bez remanencije)

Povećana reprodukcija područja oko 0-točke



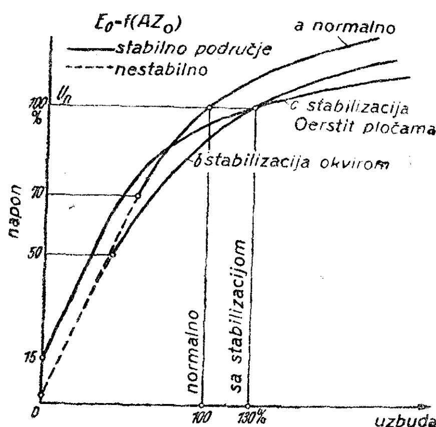
b) (s remanencijom)

Sl. 131. Samouzbuda. Ona nastupa samo onda ako je otpor uzbudnog kruga R manji od kritične vrijednosti R_{krit} (a). Polaritet je određen smjerom napona remanencije E_0 · E_0 spadne kod obratno priključene uzbude na E_2, a kod ispravnog priključka poraste na E_1, pa i onda, ako je $R > R_{krit}$ (b).

Ispitivanje ispravnog priključka vršimo na slijedeći način. Na stezaljke stroja, koji se okreće s još otvorenim uzbudnim krugom, priključimo osjetljivi voltmetar. Ovaj pokazuje malenim otklonom napon remanencije. Najbolje je uzeti instrument sa zakretnim svitkom, kojim možemo odmah ustanoviti, da li napon remanencije pokazuje traženi polaritet. Ako tome nije tako, pošaljemo kroz uzbudni namot stranu struju u istom smjeru, u kojemu će kasnije teći struja u pogonu. Ispitamo, da li je ispravan polaritet napona, koji se sada pojavljuje na stezaljkama armature. Prekinemo struju i mjerimo vrijednost preokrenutog napona remanencije. Zatim uključimo uzbudni regulator. Ako napon armature raste, onda je sve u redu. Ali ako napon remanencije pada, to je znak, da je uzbudni namot obratno priključen, i treba mu zamijeniti početak i kraj. Prema potrebi moramo promijeniti oznake. Smanjujemo li uključeni regulacioni otpor, mora sada napon armature jako porasti. Normalne strojeve možemo ispravno razdijeljenim regulatorom regulirati od 80% nominalnog napona u praznom hodu do 100% nominalnog napona kod punog opterećenja.

odnosno odgovarajućeg preopterećenja. Ako to nije moguće, treba stepene regulatora razdijeliti nanovo. Preduvjet je odgovarajuća mogućnost regulacije samog stroja. Normalno ne možemo dobiti napone stroja, koji leže na ravnom dijelu krivulje zasićenja, jer tamo nema stabilnih sjecišta s pravcem otpora. Možemo dakle promatranjem karakteristike razabrati, da li vrijednost od 80% nominalnog napona leži već na zakrivljenom dijelu krivulje. Većinom je to postignuto.

Osobito kod *uzbudnih strojeva* tražimo znatno veće područje regulacije napona. Tako imamo strojeve, koje treba regulirati isključivo samouzbudom od 60% do 100%, 30% do 100%, ili čak 10% do 100% punog napona. Taj opseg postizavamo na dva načina. Upotrebljavamo *magnetski tjesnac* u jezgri pola ili predmagnetiziranje ugradnjom *permanentno magnetičnih čeličnih ploča* u jezgru pola. Tjesnac dobivamo djelomičnim oslabljenjem presjeka pola do 50% ili stavimo između jezgre pola i jarma mjesto uobičajenih punih limova samo 2 do 6 mm debeli okvir ili prečke. U oba slučaja djeluje tjesnac kod sasvim malih polja kao nezasićeno že-

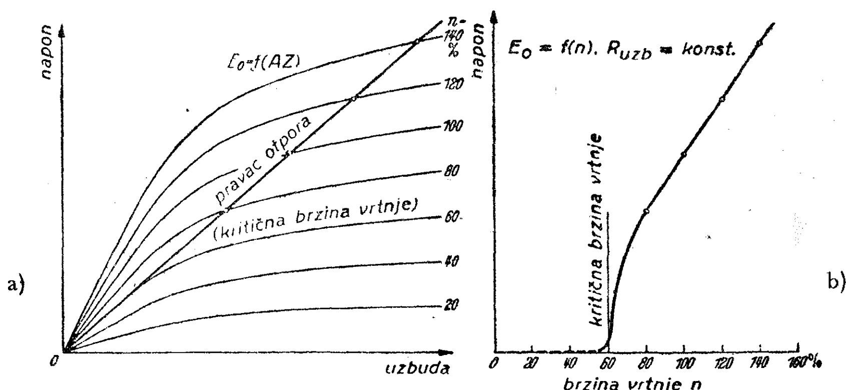


Sl. 132. Krivulje zasićenja normalnog (a), i tjesnacem (b), odnosno permanentno magnetičnim Oerstit-pločama (c) stabiliziranog istosmjernog stroja

ljezo, te u najdonjem području uopće ne utječe na krivulju zasićenja. Kod znatnije gustoće silnica tjesnac počne prvi da se zasićuje. To uzrokuje rano zakrivljenje krivulje zasićenja u usporedbi s normalnim strojem. Kod vrlo visokog zasićenja djeluju tjesnaci kao dodatni zračni raspor. U prvom slučaju, taj je dodatni raspor vrlo velik, u drugom slučaju on manje utječe, jer je razmjerno malen. Oslabljivanje jezgre pola upotrebljavamo stoga samo u slučaju, kad s bilo kojeg razloga želimo, da napon u praznom hodu poraste tek malo iznad pogonskog napona (na pr. katkada kod Krämerovog stroja). Okvir često upotrebljavamo u slučajevima, gdje želimo samo povećati opseg regulacije. Na sl. 132a, b vidimo tipičnu krivulju

praznog hoda stroja s podloženim okvirom u usporedbi s onom normalnog stroja. Na rano zakrivljenoj krivulji možemo već sasvim dolje dobiti stabilna sjecišta s pravcem otpora.

Strojeve s malim nominalnim naponom ispod 100 V opremamo, umjesto tjesnacima, t. zv. Oerstit-pločama u magnetskom krugu. Ove visokomagnetične ploče debljine 1 cm, daju stroju napon remanencije od 5% do 7,5%, ako ih smjestimo u svaki drugi pol, a napon od 10% do 15%, ako u svaki pol stavimo po jednu ploču. Počevši od ove vrijednosti, možemo napon stroja sa samouzbudom regulirati do 100%. To se odmah vidi na sl. 132c, gdje je prikazana krivulja zasićenja stroja, koji je opremljen Oerstit-pločama. Kako su ploče polarizirane, ne možemo više mijenjati polaritet stroja. Mali napon remanencije ukazuje na obrnuti položaj jedne ili više Oerstit-ploča, što djelomično ili potpuno poništava njihovo djelovanje. U takvu slučaju treba polove izvaditi i kontrolirati položaj ploča. To nije teško, jer su N-strana i S-strana označene.



Sl. 133. Samouzbuda kod promjenljive brzine vrtnje. Određivanje napona E_0 za različite brzine vrtnje (a) i prikaz u zavisnosti o brzini vrtnje (b).

Svi strojevi s povećanim opsegom regulacije napona zahtijevaju više uzbudnih *AZ* nego normalni strojevi i snaga im je zbog toga općenito nešto smanjena. Ispitivanje je inače isto kao kod ostalih strojeva.

Normalne ugljene ili grafitne četkice mogu kod sasvim malih uzbudnih strojeva, zbog svojeg, u takvu slučaju, vrlo velikog prijelaznog otpora, katkada toliko povećati ukupni otpor uzbudnog kruga, da njegova vrijednost premaši kritičnu. Općenito se može reći, da je pad napona na četkicama 1 do 2 V, dakle ove, da tako kažemo, ne propuštaju napon remanencije manjeg iznosa. Ako nailazimo na poteškoće u pogledu sigurne samouzbude kod strojeva malog nominalnog napona, možemo uzbudni namot priključiti na posebne metalne četkice, koje su izolirano smještene na iste svornike kao i ostale četkice, ali koje treba da vode samo malu

uzbudnu struju. Zbog vrlo malog pada napona na metalnim četkicama postizavamo u tom slučaju sigurnu uzbudu.

Uz kritični otpor postoji i kritična brzina vrtnje, ispod koje uz postojeći otpor uzbudnog kruga nije moguća samouzbuda. To se vidi na sl. 133a, gdje je ucrtan čitav niz krivulja zasićenja za jednoliko razmaknute brzine vrtnje, zajedno s pravcem otpora. Sjecišta dobivamo tek od one brzine vrtnje, kod koje karakteristika zasićenja dodiruje pravac otpora. Kritičnu brzinu vrtnje možemo smanjiti, ako smanjimo raspor glavnog pola, ili je još dalje povećati, ako povećamo raspor. Kritična brzina vrtnje važna je kod svih uzbudnih strojeva, koje tjeramo promjenljivom brzinom vrtnje. Sl. 133b pokazuje napon praznog hoda u zavisnosti o brzini vrtnje stroja sa samouzbudom. Dio, koji linearno raste ispod kritične brzine, potječe od remanentnog magnetizma.

Pokus kratkog spoja. Dok pokus kratkog spoja izvodimo kod većine električkih strojeva, osobito kod sinhronih i asinhronih strojeva i transformatora, kod istosmjernih strojeva radimo ga tek rijetko kada. Kod t. zv. strojeva konstantne struje snimamo točku kratkog spoja potpuno uzbuđenog stroja, koji se vrti nominalnom brzinom vrtnje kao posljednju točku karakteristike opterećenja. Tu ubrajamo reflektorske generatore, svarne generatore i specijalna postrojenja sistema Rosenberg, Krämer, Pestarini, Austin i dr. Struju kratkog spoja, koju kod toga dobivamo zovemo stacionarnom, za razliku od znatno veće dinamičke struje kratkog spoja, koja nastupa kod iznenadnog kratkog spoja na stezaljkama i koja se može samo oscilografski mjeriti. Često puta ona prelazi u stacionarnu struju tek nakon više titraja. Kod mnogih istosmjernih strojeva, momentani kratki spoj je izvanredno velik, te jako ugrožava stroj. Katkada ga izbjegavamo brzim sklopkama, koje isklope prije no što postigne maksimalnu vrijednost.

Pravi pokus kratkog spoja izvodimo na porednim generatorima. Neuzbuđeni stroj kod nominalne brzine vrtnje potpuno kratko spojimo, pri čemu iz kratko spojenog kruga uklonimo eventualni serijski uzbudni namot. Na uključenom ampermetru promatramo nastalu struju kratkog spoja, koja smije doseći samo 10% nominalne struje. Ovu struju tjera napon remanencije. Prejaki pomoćni polovi ili pomak četkica iz neutralnog položaja prema natrag mogu je znatno povećati. U tom slučaju raste ona neprekidno, kad se krug zatvori i dosegne katkada vrijednosti, koje mogu biti daleko iznad nominalne struje. To nije nikada dopustivo. U takvu slučaju pomaknemo četkice naprijed za odgovarajući razmak ili slabimo komutaciono polje povećavanjem raspora pomoćnih polova, dok struja kratkog spoja ne padne ispod 10% nominalne struje. Koju ćemo od ovih mjera poduzeti zavisi o komutaciji stroja, jer pomoćne polove smijemo samo toliko oslabiti, koliko to dopušta zahtjev besprijekorne komutacije kod

nominalnog opterećenja i kod preopterećenja. Stroj pokazuje dobra svojstva u kratkom spoju, ako možemo umjerenom uzbudom struju jednoznačno povećavati i opet smanjivati. Struja kratkog spoja I_k i uzbudna struja i_k u linearnoj su vezi.

Gubitke kratkog spoja ne mjerimo, jer ih ne možemo jednostavno i jednoznačno rastaviti na pojedine komponente. Napose ne mjerimo dodatne gubitke istosmjernog stroja na taj način, nego ih isključivo uzimamo u obzir kao postotak nominalne snage, koji određuju propisi (REM).

Ispitivanja komutacije i trajnog rada u kratkom spoju u stvari ne predstavljaju pokuse kratkog spoja.

Pokusi opterećenja. Pokuse opterećenja izvodimo po mogućnosti na svakom stroju. Cilj im je snimanje karakteristika regulacije, napona i brzine vrtnje. Možemo ih započeti, tek kad su četkice dobro ubrušene i kad komutacija teče besprijekorno. Četkice treba da stoje u svojem definitivnom položaju. To je potrebno zato, što zbog reakcije armature jako utječe na ponašanje opterećena stroja. Prve točke opterećenja snimamo kod motora ili generatora, zbog opreznosti s nešto naprijed pomaknutim četkicama, osobito ako ispitivani stroj i stroj ispitne stanice rade svaki na drugu mrežu. Ako se stroj ponaša stabilno, vratimo se po mogućnosti u neutralni položaj. Strojeve za pogon u oba smjera vrtnje, dakle na pr. motore za dizala, smijemo opteretiti samo uz četkice u neutralnom položaju. Ma da možemo vrlo točno odrediti nul-položaj nosača četkica postupkom, koji je opisan na str. 9 , ipak nam pokus opterećenja, ako su se četkice mogle dovoljno dugo prilagođivati u oba smjera vrtnje, daje još jednu mogućnost, da taj položaj kontroliramo. Stroj opteretimo u oba smjera vrtnje, osobito kod motora ili strojeva agregata za izjednačenje, te mjerimo dobivenu brzinu vrtnje, odnosno napon na stezaljkama. Kad se ovi podudaraju za oba smjera, neutralni položaj nosača je ispravan. Ako se razlikuju, odredit ćemo srednju vrijednost za oba mjerenja i zakrenuti nosač oprezno pod opterećenjem, dok ne postignemo srednju vrijednost. Pokus u drugom smjeru potvrđuje ispravnost novog položaja.

Agregate ispitujemo tek onda, kad su završena ispitivanja pojedinih strojeva, od kojih su ovi sastavljeni. Tek kad je poznata karakteristika svakog pojedinog, možemo kod eventualnog odstupanja u ponašanju agregata odrediti uzrok. Naprotiv, ako odmah započnemo sa skupnim ispitivanjem, teško ćemo izbjeći katkada dugotrajno pokušavanje. To vrijedi već i kod jednostavno složenih agregata, kao što ih imamo na pr. kod agregata za izjednačenje.

Najvažnije vrste strojeva obrađivat ćemo u pogledu snimanja i grafičkog određivanja njihovih karakteristika nešto dalje. Razlikuju se samo po broju i spoju uzbudnih namota.

Korekcija brzine vrtnje istosmjernih strojeva u praznom hodu ili kod opterećenja promjenom raspora. Često se brzina vrtnje neopterećena ili opterećena istosmjernog stroja ne slaže s vrijednošću, koju zahtijevamo. Ako odstupanje leži unutar propisanih tolerancija (str. 233), možemo općenito odustati od korekcije. Ako pak odstupanje prelazi tolerancije ili ako treba udesiti više strojeva na potpuno istu brzinu vrtnje kod iste uzbudne struje, onda mijenjamo brzinu vrtnje povećavanjem ili smanjivanjem raspora ispod glavnih polova. Povećanju odgovara veća brzina vrtnje, smanjenju manja. Potrebnu promjenu raspora možemo vrlo točno proračunati na osnovu mjerenja praznog hoda i mjerenja opterećenja. Navedeni postupak važi za sve vrste motora i generatora. Zadatak je dakle ovakav: Kod struje $I = 0$ ili $I = I_n$ izmjerili smo brzinu vrtnje n, uz napon mreže U na stezaljkama stroja. Ovu brzinu vrtnje treba promijeniti na vrijednost n'. Poznata je krivulja zasićenja stroja kod bilo koje brzine vrtnje n_0, koja naravno može s bilo kojeg razloga biti n ili n'. Otpor kruga armature neka je R. Prvo odredimo obje EMS E i E' po ovim formulama:

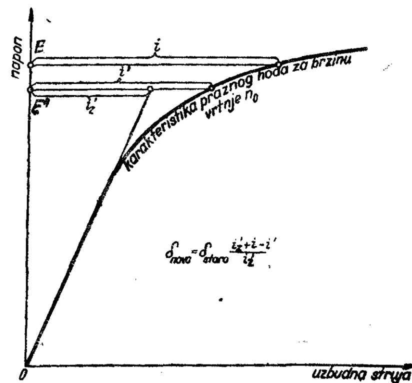
$$E = (U - I \cdot R) \cdot \frac{n_0}{n}\,,\ \text{te}\ E' = (U - I \cdot R) \cdot \frac{n_0}{n'}\ \text{kod motora, odnosno}$$

$$E = (U + I \cdot R) \cdot \frac{n_0}{n}\,,\ \text{te}\ E' = (U + I \cdot R) \cdot \frac{n_0}{n'}\ \text{kod generatora,}$$

i tražimo pripadne vrijednosti uzbudne struje i, odnosno i' s karakteristike praznog hoda $E_0 = f(i)$ kod brzine vrtnje n_0. Osim toga očitamo dio i'_z struje i', koji otpada na zračni raspor. Novi raspor dobivamo onda:

$$\delta_{novi} = \delta_{stari} \cdot \frac{i_z' + (i - i')}{i_z'}\,.$$

Raspor treba dakle povećati, kad je i veće od i', a smanjiti, kad je i' veće od i. Na sl. 134 riješen je zadatak za slučaj, gdje želimo povećati brzinu vrtnje za 10%. Ako želimo promijeniti brzinu vrtnje u praznom hodu, treba naravno za I uvrstiti 0.



Sl. 134. Mijenjanje brzine vrtnje promjenom raspora

Trajni rad. Za izvođenje pokusa trajnog rada istosmjernog stroja vrijede opće upute navedene na str. 17. Kod malih i srednjih strojeva možemo većinom raditi s nominalnom brzinom vrtnje, naponom i strujom. Samo kod velikih strojeva moramo, s obzirom na veličinu raspoložive istosmjerne mreže, posegnuti za radom s reduciranim naponom ili čak za radom u potpunom kratkom spoju. U posljednjem slučaju izve-

demo još jednom pokus trajnog rada s potpuno uzbuđenim neopterećenim strojem, te zbrojimo nadtemperature iz oba pokusa. Tako određene temperature nešto su previsoke, pa sadrže stanovitu sigurnost. Treba da pripazimo ne samo na namot, željezo i kolektor, već i na bandaže, jer katkada mogu rasipne silnice glavnog polja ili magnetizirajuće djelovanje blizu provedenih vodova, kroz koje teče struja armature (kompenzacioni namot), inducirati u njima jake vrtložne struje, koje dovode do odlemljivanja. Prikladna je protumjera među ostalim izoliranje pojedinih slojeva bandaže ili odstranjivanje preblizih vodova.

Snimanje krivulje polja. Kod strojeva bez kompenzacionog namota pojavljuje se kod opterećenja, zbog magnetizirajućeg djelovanja armature, deformacija polja, koja se očituje u vrlo različitoj gustoći silnica pod oba brida polnih nastavaka. Kod generatora znatno je jače zasićen stražnji brid, kod motora prednji brid. Krivulja polja neopterećenog stroja, motora ili generatora, pokazuje simetričnu podjelu toka na obje strane od sredine polnog nastavka.

Krivulja polja neopterećena ili opterećena istosmjernog stroja može se odrediti točno ili približno na različite načine. Najtočnije uspijeva određivanje krivulje polja s pomoću pokusnog svitka dijametralnog koraka, dakle širine 180 el. stupanja, koji je smješten što bliže površini armature. Oscilografska snimka napona, koji se u njemu inducira, kad stroj ide, reproducira pravu krivulju polja sa svim detaljima, koji se pojavljuju zbog utora. Mjerilo za magnetsku indukciju B dobivamo, ako odredimo maksimalnu indukciju B_{max}, koja odgovara najvećem induciranom ukupnom naponu, prema formuli:

$$B_{max} = \frac{e_{max}}{2w} \cdot \frac{100}{l} \cdot \frac{100}{v} \cdot 10000$$

u gausima, gdje je w broj zavoja pokusnog svitka, l duljina željeza armature u cm, v obodna brzina armature u cm/sek i e_{max} najveći inducirani napon s oscilograma u V.

Praktički je lakše snimiti krivulju polja s dvije pomoćne četkice od bakra, koje pritisnemo na kolektor i pomičemo od (+)-četkice prema (—)-četkici. Obje četkice razmaknute su međusobno za k kolektorskih lamela, gdje treba uzeti $k = 1$ za jednovojni petljasti i valoviti namot. Kod m-vojnih petljastih ili valovitih namota odaberemo $k = m$. Mjerimo kut pomaka α, očitamo svaki put napon e, koji se pojavljuje na četkicama i nanosimo $e/2$ kod petljastih, a $e/2p$ kod valovitih namota u zavisnosti o kutu pomaka α. Dobivamo tako kod jednozavojnih armatura raspodjelu napona induciranog u jednom vodiču po širini pola, a ovaj napon daje srednju vrijednost magnetske indukcije u svakoj točki između glavnih četkica. Detalji se do određenog stupnja gube. Mjerilo za magnetsku

indukciju dobivamo kao prije, samo mjesto $2w$, uvrstimo broj 1, koji odgovara polovici jednog zavoja. Jedino ako armatura ima više od jednog zavoja po lameli, treba napon još podijeliti s odgovarajućim brojem.

Ako jednu pomoćnu četkicu ostavimo stalno priključenu na jednu od četkica stroja, a samo drugu pomičemo, dok konačno ne dosegne četkicu drugog polariteta, te nanosimo mjereni napon u zavisnosti o kutu pomaka, dobit ćemo t. zv. krivulju napona na kolektoru, s maksimalnom vrijednosti, jednakom naponu stroja. Grafičkim diferenciranjem ove, dobivamo krivulju polja stroja i to u istom mjerilu kao kod prošlog pokusa, ako odabiramo diferencije onih ordinata, koje odgovaraju razmaku od k lamela.

Svojstvo bizmuta, da reagira na gustoću silnica magnetskog polja promjenom svog otpora, možemo također iskoristiti, da odredimo krivulju polja.

Mjerenje valovitosti istosmjernog napona. Napon, koji daje istosmjerni stroj, sadrži valove, koji mogu prouzročiti titranje priključenih svjetiljaka i smetnje u telefonskim vodovima ili u radio-primanju. Kosim postavljanjem utora, priključivanjem zaštitnih kondenzatora protiv smetnji i sličnim sredstvima pokušavamo valovitost što više smanjiti. Preostali dio mjerimo oscilografskim snimkom. Snimanje punog istosmjernog napona općenito malo pomaže, jer valovi iznose samo cca 1% punog napona, te ih stoga u oscilogramu jedva možemo raspoznati. Zato dajemo prednost spojevima, kod kojih punom naponu ili jednom njegovom dijelu spojimo nasuprot gotovo isto toliki napon, koji daje akumulator. Oscilografiramo onda samo diferenciju, koju udesimo tako, da se na osnovnu vrijednost od 2 V superponiraju valovi u punom iznosu, odnosno iznosu, koji odgovara djelomičnom naponu. Ne treba zaboraviti, da najmanja promjena napona stroja ili protunapona procentualno vrlo jako mijenja diferenciju napona, tako da su petlje oscilografa donekle ugrožene.

Pokus treperenja žarulja. Vrlo jednostavno možemo ocijeniti valovitost istosmjernog napona subjektivnim pokusom. Na stezaljke stroja, koji ispitujemo priključimo, već prema visini napona, jednu ili više žarulja, spojenih u seriju i smještenih u zamračenoj prostoriji. Svijetlo žarulja rasvjetljuje izrezak iz novina, koji promatramo cca 1 minutu. Ako se slika slova pričinja mirnom, onda je napon u redu, jer oko vrlo oštro reagira na najmanja kolebanja napona ne prevelike frekvencije. Visoke nadvalove, koji uzrokuju smetnje na telefonskim uređajima, ne možemo međutim ovako ustanoviti. U tu svrhu služimo se posebno izvedenim instrumentima za mjerenje smetnji.

Određivanje korisnosti. Korisnost istosmjernih strojeva određuje se u praksi gotovo isključivo metodom pojedinačnih gubitaka. Druge metode, navedene na str. 39, tek rijetko primjenjujemo. Ukupni gubici sastoje

se od užih gubitaka praznog hoda, uzbudnih gubitaka i teretnih gubitaka, u koje ubrajamo i dodatne gubitke.

Uži gubici praznog hoda sastoje se od gubitaka trenja, zavisnih samo o brzini vrtnje n i od gubitaka u željezu, koji zavise o brzini vrtnje n i o EMS, dakle o $U + I \cdot R$ kod generatora, odnosno $U - I \cdot R$ kod motora. Određujemo ih iz rezultata pokusa praznog hoda.

Uzbudne gubitke računamo kao produkt nominalnog uzbudnog napona i uzbudne struje, uključivši tako i gubitke u uzbudnom regulatoru ili kao produkt napona na stezaljkama uzbudnog stroja i uzbudne struje, podijeljen sa korisnošću uzbudnog stroja, koja obuhvata i gubitke eventualnih daljnjih uzbudnih strojeva. Kod regulacije u uzbudnom krugu uzbudnog stroja mijenja se, naravno, njegov napon na stezaljkama s uzbudnom strujom glavnog stroja. Gubitaka prijelaza na četkicama u uzbudnom krugu istosmjernih strojeva nemamo.

Gubitke uzbudnog stroja, koji tjeramo posebnim motorom ne uračunavamo u uzbudne gubitke glavnog stroja.

Teretni gubici sastoje se od gubitaka strujne topline u namotima kruga armature, gubitaka prijelaza na četkicama i dodatnih gubitaka. Gubitke strujne topline računamo: (struja armature na kvadrat) puta (otpor armature + otpor pomoćnih polova + otpor kompenzacionog namota + otpor serijskog uzbudnog namota), gdje treba uvrstiti tople vrijednosti otpora iz trajnog rada ili, ako ove nismo određivali, otpore preračunate na 75° C. Gubitke prijelaza računamo prema propisima (REM) kao struju armature puta 2. U stvari može pad napona, uzet za obje četkice, varirati između 1,8 i 2,3. Obično ga ne određujemo mjerenjem. Dodatne gubitke uvrštavamo kod nekompenziranih strojeva 1%, kod kompenziranih strojeva 0,5% od pretvorene električke snage kod nominalnog opterećenja. Računamo ih dakle kod generatora iz predane snage, kod motora iz primljene snage potpuno opterećenog stroja. Kod djelomičnog opterećenja uvrštavamo iznose reducirane u omjeru kvadrata struje armature. Općenito dakle vrijedi:

$$\text{dodatni gubici} = \frac{(\text{struja armature})^2}{(\text{nominalna struja})^2} \cdot \frac{\text{nominalni napon} \cdot \text{nominalna struja}}{100}$$

kod nekompenziranog stroja, odnosno:

$$\text{dodatni gubici} = \frac{(\text{struja armature})^2}{(\text{nominalna struja})^2} \cdot \frac{\text{nominalni napon} \cdot \text{nominalna struja}}{200}$$

kod kompenziranih strojeva. Principijelno odgovaraju dakle dodatni gubici strujnoj toplini u dodatnom djelatnom otporu u krugu armature, za koji treba uzeti vrijednost $U_n/100I$ odn. $U_n/200I_n$.

Kod strojeva sa samouzbudom treba uvijek točno razlikovati mrežnu struju od struje armature, koja je kod generatora za iznos uzbudne struje

veća, kod motora, naprotiv, manja od prve. Kod velikih strojeva razlika je, istina, vrlo mala; veličina joj se kreće od 1,5 do 0,5%.

Zbroj gubitaka daje ukupne gubitke, koje treba kod generatora dodati predanoj snazi, da bismo dobili primljenu snagu. Kod motora odbijemo ih od snage, koju motor uzima iz mreže i dobijemo predanu mehaničku snagu. Možemo ovdje upozoriti i na razmatranja kod sinhronog stroja na str. 191.

Korisnost η u postocima računamo:

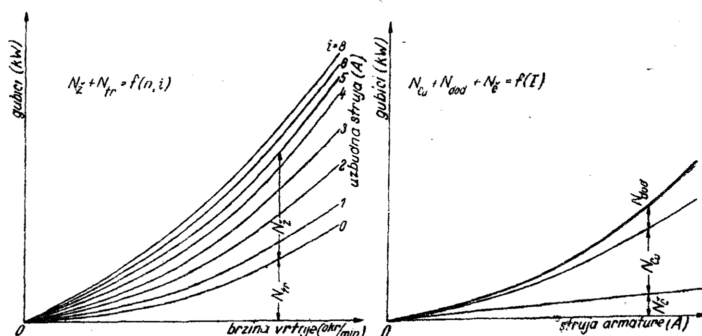
$$\eta\,\% = 100 - \frac{\Sigma N_g \cdot 100}{N_2 + \Sigma N_g}$$

kod generatora, odnosno

$$\eta\,\% = 100 - \frac{\Sigma N_g \cdot 100}{N_1}$$

kod motora. Pri tome znači ΣN_g sumu svih gubitaka, N_2 predanu električku snagu generatora, a N_1 primljenu električku snagu motora.

Uobičajeno je, da korisnost za djelomična opterećenja određujemo kod nominalne brzine vrtnje, ma da se u stvari brzina vrtnje kod toga nešto malo mijenja. Naprotiv, kod strojeva s velikim padom brzine vrtnje, osobito dakle kod serijskih motora, određujemo korisnost za faktičnu brzinu vrtnje. Potrebno je onda posebnim pokusima praznog hoda snimiti gubitke u željezu i gubitke trenja također i kod tih brzina. Ne ćemo međutim snimati čitavu krivulju, već se zadovoljavamo snimanjem jedne točke, koja odgovara EMS kod opterećenja. Rastavljanje na gubitke u željezu i gubitke trenja nije tada moguće, a nije ni potrebno.



Sl. 135. Baždarenje nezavisno uzbuđenog istosmjernog stroja. Dijagram A daje gubitke u željezu + gubitke trenja za brzinu vrtnje n i uzbudnu struju i, dijagram B teretne gubitke za struju I.

Baždarenje strojeva za opterećenje i za pogon. Strojeve ispitne stanice upotrebljavamo obično u širokom području brzine vrtnje i napona kao generatore i kao motore. Kako je kod mnogih pokusa potrebno po-

znavati snagu, koju oni predaju ili primaju na osovini, zgodno je da za strojeve, koje češće upotrebljavamo izradimo dijagrame, s kojih možemo brzo odrediti gubitke za bilo koji slučaj opterećenja. Odabiranjem nezavisne uzbude isključujemo uvijek uzbudne gubitke. Treba dakle poznavati samo gubitke u željezu plus gubitke trenja, koji odgovaraju brzini vrtnje n i stanju zasićenja stroja, koje je određeno uzbudnom strujom i, te gubitke strujne topline od struje armature I. Najbolje je da u dijagram A (sl. 135), nanesemo gubitke u željezu i gubitke trenja u zavisnosti o brzini vrtnje n, koje smo odredili nizom pokusa praznog hoda, uzimajući kao parametar određeni broj vrijednosti uzbudne struje i u jednolikim razmacima. U drugom dijagramu B nanesemo gubitke zavisne o struji I, dakle sumu $I^2 \cdot R + I \cdot 2 + I^2 \cdot R_{od}$ u zavisnosti od I. R je ukupni otpor kruga armature, koji odgovara temperaturi ugrijana stroja u radu, a R_d zamišljeni dodatni otpor, koji odgovara dodatnim gubicima, i računa se:

$$R_{dod} = \frac{U_n}{100 \cdot I_n}$$

za nekompenzirani stroj, koji najviše upotrebljavamo. Kod kompenziranih strojeva, koje u ispitnoj stanici rijetko upotrebljavamo treba mjesto 100 uvrstiti broj 200.

Ova dva dijagrama dostaju. Kod motorskog rada određujemo snagu na osovini:

predana snaga motora = napon na stezaljkama · struja armature — (gubici s dijagrama A za brzinu vrtnje n i uzbudnu struju i) — (gubici s dijagrama B za struju I).

Kod generatorskog rada određujemo primljenu snagu na osovini:

primljena snaga generatora = napon na stezaljkama · struja armature + (gubici s dijagrama A za brzinu vrtnje n i uzbudnu struju i) + (gubici s dijagrama B za struju armature I).

U stvari dodatni gubici zavise o brzini vrtnje n stroja. No kako ih mjerenjima ne možemo jednoznačno odrediti, uzimamo da su zavisni samo o struji, kao što smo to gore pretpostavili. Ni gubici u željezu nisu sasvim točni, jer nismo uzeli u obzir, da se polje mijenja djelovanjem struje armature. U usporedbi s točnošću ukupnog rezultata ima to tek podređeno značenje, jer pogreška od 5 do 10% kod gubitaka u željezu, ako uzmemo, da su ovi cca 2%, daje ukupnu pogrešku od 0,1 do 0,2%. U prilog ove jednostavne metode govori ipak njezina veća pouzdanost prema drugim kompliciranijim postupcima.

Krivulje za dijagram A najbolje ćemo snimiti drugim, baždarenim već strojem, generatorskim postupkom. Udešavamo pojedine vrijednosti uzbudne struje i, i mjerimo gubitke od najmanje do najveće brzine vrtnje.

Ako ne raspolažemo pomoćnim strojem, moramo gubitke odrediti motorskim postupkom. Priključimo stroj na mrežu konstantnog napona i udešavamo pojedine uzbudne struje, pri čemu pazimo na najveću dopuštenu brzinu vrtnje. Očitavamo: napon mreže U, struju armature I, uzbudnu struju i, i brzinu vrtnje n. Uže gubitke praznog hoda računamo dovoljno točno kao $N_ž + N_{tr} = (U - 2{,}0) \cdot I$. Ova mjerenja ponovimo za niz drugih napona mreže. Zatim nanesemo gubitke u zavisnosti o brzini vrtnje n, i spojimo točke iste uzbudne struje i. Treba dakle unaprijed paziti kod snimanja da udešavamo uvijek iste uzbudne struje i, da bismo izbjegli naknadnu interpolaciju rezultata.

Neposredno možemo dobiti tražene krivulje $N_ž + N_{tr} = f$ (n, uz i = konst), ako izvedemo pokus zaustavljanja za svaku pojedinu uzbudnu struju. Na taj način možemo, napose, nadopuniti grane krivulja za male brzine. Preporučuje se kontrolirati pojedine točke u praznom hodu, zbog manje točnosti ovakva mjerenja gubitaka.

Zgodno je da u dijagrame A i B unesemo i vrijednost otpora armature R, i prije svega točno zamašni moment GD^2 stroja, jer ove vrijednosti uvijek nanovo trebamo.

Tolerancije. Za korisnost, napon i brzinu vrtnje istosmjernog stroja vrijede prema propisima (REM) ove tolerancije:

Garancija za:	Dopušteno odstupanje:
Korisnost η%	$\pm \frac{100 - \eta\%}{10}$, zaokruženo na 0,1%, ali najmanje 0,5%. (To znači 10% tolerancije u ukupnim gubicima za η ispod 95%.)

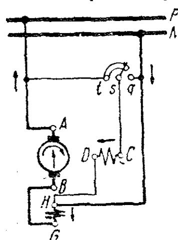
Brzinu vrtnje	uz nominalnu snagu do 1,1 kW	do 11 kW	preko 11 kW
1. Poredni motor	± 10%	± 7,5%	± 5%
2. Kompaundni motor	± 12%	± 8,5%	± 6%
3. Serijski motor	± 15%	± 10%	± 7%

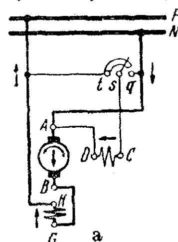
Promjenu brzine vrtnje	± 10% garantirane vrijednosti kod svih motora i snaga.
Promjenu napona	± 20% garantirane promjene napona, ali najmanje 2% kod kompaundnih generatora.

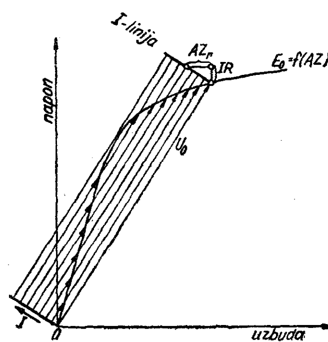
b) Generatori

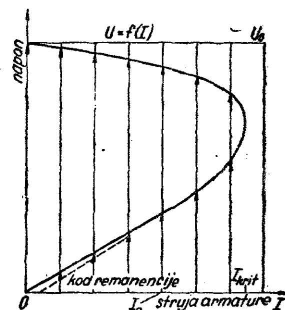
Poredni generator sa samouzbudom. Generator sa samouzbudom opterećujemo s pripadnim finostepenim porednim regulatorom bilo na mrežu, bilo na otpornike. Ako radimo na mrežu konstantnog napona, možemo snimiti samo karakteristiku regulacije $i = f(I)$. Kod opterećivanja na otpornike dobivamo i karakteristiku napona $U = f(I)$, ako ne diramo po-

redni regulator. Obje krivulje slijede jedna iz druge upotrebom karakteristike praznog hoda $E_0 = f(i)$. Sl. 136 prikazuje spoj stroja i grafičko određivanje karakteristike napona, kao i prikaz bez deformacije. Za dinamo sa samouzbudom karakteristična je kritična vrijednost struje armature, kod koje napon na stezaljkama naglo padne, a osim toga karakteristična je i vrlo mala vrijednost struje trajnog kratkog spoja, koja









a) b) c)

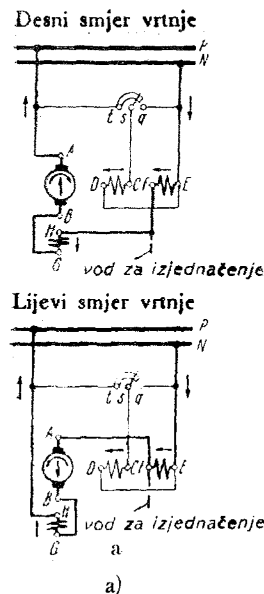
Sl. 136. Istosmjerni generator sa samouzbudom. Spoj (a) i karakteristika napona $U = f(I)$ (b) i (c).

je uglavnom određena samo naponom remanencije. Kao što smo rekli kod pokusa kratkog spoja, četkice postavimo tako, da ova struja ne prijeđe vrijednost od 10% nominalne struje.

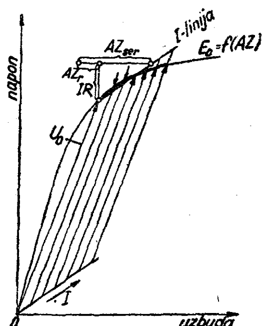
Generator sa samouzbudom i dodatnim serijskim namotom (kompaundni generator). Generator u ovom spoju općenito ne smije raditi na krutu mrežu u ispitnoj stanici, jer dodatni serijski namot većinom izaziva uspon karakteristike napona u području od praznog hoda do otprilike polovine opterećenja. Opterećivanje na otpornike je naprotiv bez daljnjega moguće. Ako ipak želimo raditi na mrežu, onda isključimo serijski namot iz kruga armature i dovodimo mu struju iz stranog izvora, i to tako da uvijek bude jednaka i, naravno, istoga smjera kao struja armature. Na taj način postizavamo mekši rad generatora. Sl. 137 prikazuje spoj i grafičko određivanje karakteristike napona na stezaljkama stroja.

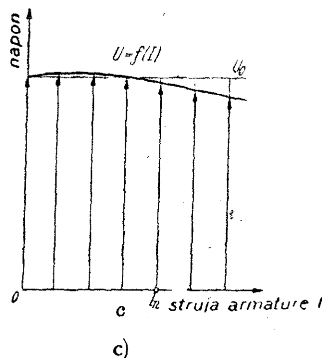
Generator s nezavisnom uzbudom. To je uobičajeni spoj većih istosmjernih generatora. Nezavisnu uzbudu daje obično uzbudni stroj vezan spojkom s glavnim strojem. U tom slučaju govorimo o vlastitoj uzbudi. Rjeđe ga daje zasebno postavljen uzbudni pretvarač. Ispitivanje kod opterećenja možemo izvoditi po želji na mrežu ili na otpornike, jer karakteristika napona teče silazno. Razlika prema stroju sa samouzbudom je u tome, što pad napona kod opterećenja ne može utjecati na uzbudu, zbog čega je

stroj s nezavisnom uzbudom znatno tvrđi. Sl. 138 pokazuje njegov spoj i grafičko određivanje karakteristike napona.



Generator s nezavisnom uzbudom i dodatnim protuserijskim namotom (protukompaundni generator). Prirodna krutost stroja s nezavisnom uzbudom u pogledu napona u mnogim slučajevima nije poželjna s obzirom na ponašanje motora, koje on poji. To je slučaj na pr. kod pokretačkih genera-

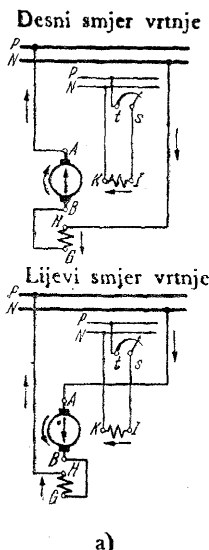


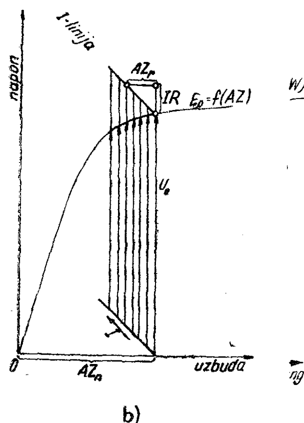


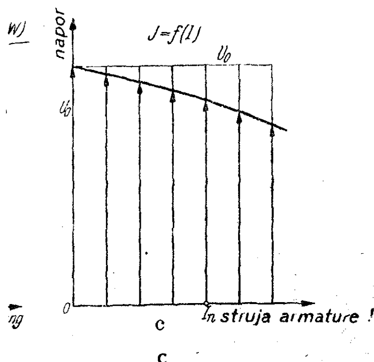
a) b) c)

Sl. 137. Istosmjerni generator sa samouzbudom i dodatnom serijskom uzbudom. Spoj (a) i karakteristika napona $U = f(I)$ (b) i (c).

tora za sve vrste motora za oba smjera vrtnje. U tom slučaju izvedemo još dodatni protuserijski namot s malo zavoja, koji slabi polje. Budući da karakteristika napona sada jače silazi, možemo ovakav stroj bez daljnjega opterećivati i na mrežu. Značajna je znatno manja struja kratkog spoja, koja ne može narasti







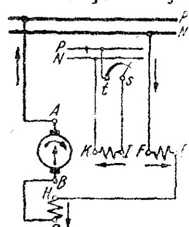
a) b) c

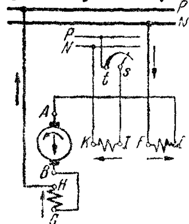
Sl. 138. Nezavisno uzbuđeni istosmjerni generator. Spoj (a) i karakteristika napona $U = f(I)$ (b) i (c). ($I \cdot R$ uzeto jako uveličano!)

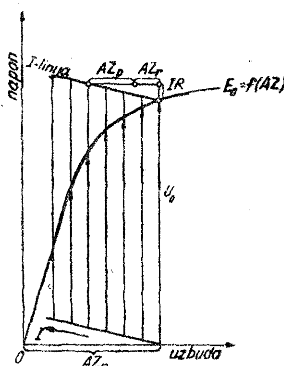
preko vrijednosti, što je dobivamo, ako pomnožimo struju i broj zavoja nezavisne uzbude i podijelimo s brojem zavoja protuserijskog namota. Sl. 139 pokazuje spoj i tumači grafičko određivanje karakteristika.

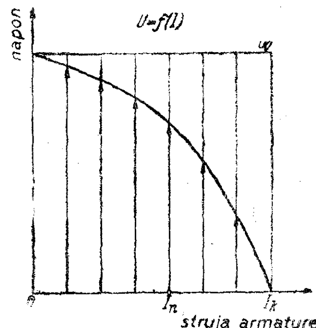
Strojeve s nezavisnom uzbudom i serijskim namotom, koji pojačava polje ne izvodimo gotovo nikada.

Serijski generator. Ovaj generator izvodimo samo još za specijalne svrhe i susrećemo ga u većem opsegu samo kod kočenja motora za vozila (tramvaji), gdje ga dobivamo preklapanjem uzbudnog namota. On nema napona praznog hoda, ukoliko ne označimo tako napon remanencije. Uzbuđuje se tek kad ga opteretimo na otpornike, i to samo onda, ako je otpor manji od kritičnog otpora, koji je određen priklonom karakteristike praznog hoda. Napon jako raste, kad raste i struja opterećenja; kod većih vrijednosti ostaje konstantan, da bi od određenog iznosa dalje opet polako padao. Zbog









a) b) c)

Sl. 139. Istosmjerni generator s nezavisnom uzbudom i dodatnim protuserijskim namotom. Spoj (a) i karakteristika napona $U = f(I)$ (b) i (c).

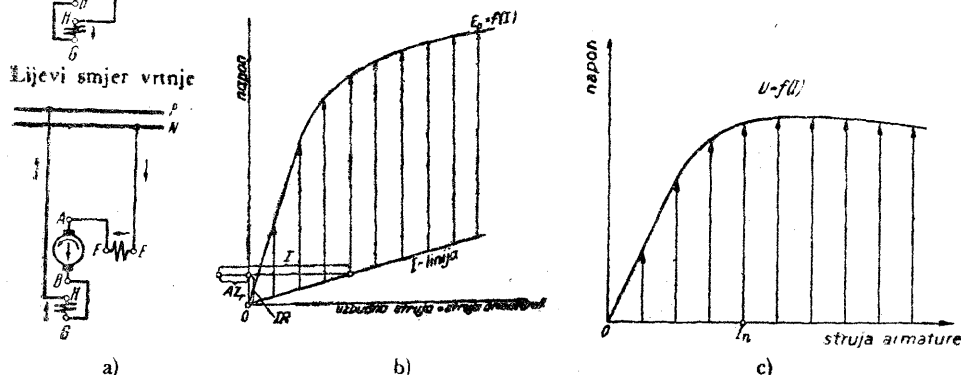
ovakva ponašanja možemo ga u normalnom spoju opterećivati samo na otpornike. Ako stroj kod ispitivanja treba da radi na mrežu, prespojimo ga na nezavisnu uzbudu. Tada se ponaša kao nezavisno uzbuđeni stroj sa slabo silaznom karakteristikom.

Sl. 140 pokazuje spoj stroja i grafičko određivanje karakteristike napona.

Uz pomoć rijetko primijenjenog dodatnog namota za samouzbudu ili nezavisnu uzbudu možemo kod serijskog generatora dobiti napon i bez opterećenja.

Krämerov stroj (stroj sa tri uzbude). Ovim imenom nazivamo stroj vrlo prikladan za mnoge svrhe, opremljen nezavisnom uzbudom, samouzbudom, koja je potpomaže, i osim toga protuserijskom uzbudom, koja je slabi. Zbog toga ga i nazivamo strojem sa tri uzbude. Upotrebljavamo ga za napajanje normalnih, nezavisno uzbuđenih motora, koji rade pod ote-

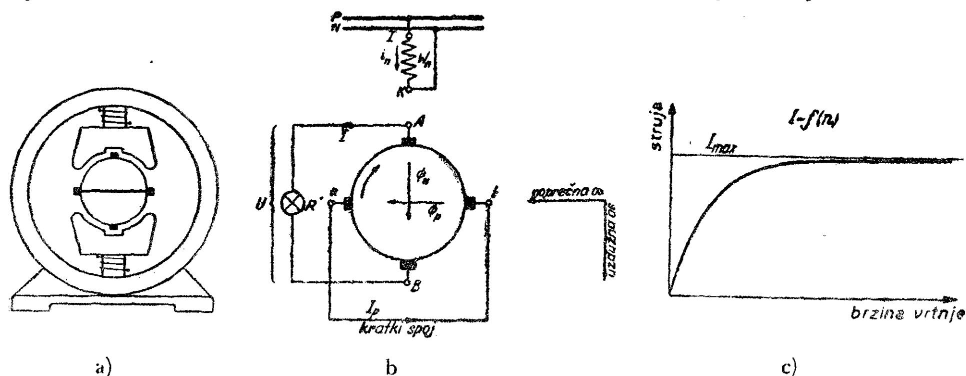
žanim okolnostima, te ih — na pr. kod pogona bagera i sličnih strojeva — preveliki moment može često zaustaviti. Ispitivanje Krämerovog stroja vršimo uvijek zajedno s pripadnim motorom, no možemo ga opteretiti i s otpornicima. Napon se kod rada mijenja od maksimalne vrijednosti u praznom hodu do nule u kratkom spoju, zbog čega moramo odustati od ispitivanja na mrežu. Broj zavoja protuserijskog namota određuje visinu struje kratkog spoja, ako se AZ nezavisne uzbude ne mijenjaju. Nezavisna uzbuda i samouzbuda zajedno određuju iznos napona u praznom



a) b) c)
Sl. 140. Serijski generator. Spoj (a) i karakteristika napona (b) i (c).

hodu. Sva tri namota zajedno možemo tako udesiti, da dobivamo traženi par vrijednosti napona na stezaljkama U i pripadne struje opterećenja I.

Sl. 120 prikazuje spoj Krämerovog stroja, a njegovu karakteristiku napona možemo lako odrediti za sve moguće slučajeve prema prikazu na



a) b c)
Sl. 141. Rosenbergov stroj. Sastav (a), spoj rasvjetnog dinama (b), karakteristika struja-brzina vrtnje (c). (Kod svarnog stroja spojen je uzbudni namot u seriju s armaturom.)

sl. 124. Osobito možemo odmah uočiti, kako utječe jakost pojedinih namota.

Rosenbergov stroj s poprečnim poljem. Ovaj stroj upotrebljavamo za vagonsku rasvjetu, reflektore, svarne strojeve i slične svrhe. Sa shematskog

prikaza na sl. 141a razabiramo konstruktivni sastav ovog zanimljivog stroja. Jezgre polova su slabe, a na njima su pričvršćeni osobito jaki nastavci. Na kolektoru kližu po svakom paru polova dva sloga četkica mjesto uobičajenog jednog sloga, a stoje u smjeru osi polova, odnosno okomito na taj smjer. Četkice su poprečno prema polovima međusobno kratko spojene, druge dvije vodimo do potrošača. U spoju prema slici 141b, koji služi za vagonsku rasvjetu, šaljemo kroz namot nezavisne uzbude s brojem zavoja w_n struju i_n. Polje glavnih polova izaziva u kratko spojenom krugu struju I_p koja stvara poprečno polje armature Φ_p, kojemu pogoduju jako formirani polni nastavci. To je pravi korisni tok stroja. Ovaj inducira među radnim stezaljkama A, B napon U, koji dobiva potrošač. Struja potrošača I, koja teče kod opterećenja, slabi uzdužno polje u smjeru glavnih polova, jer nasuprot magnetizirajućim $AZ_n = i_n \cdot w_n$ nezavisnog uzbudnog namota, djeluju $AZ = I \cdot w'_a$, koji slabe polje. Pri tome razumijevamo pod w'_a broj zavoja namota, koji je po magnetizirajućem djelovanju ekvivalentan namotu armature. Razabiramo, da struja kratkog spoja I_p mora padati, kad I s bilo kojeg razloga raste. No kad I_p pada, smanjuje se i o njoj zavisan poprečni tok Φ_p a s ovim i korisni napon U i time konačno I. Naprotiv, I_p se poveća kad I pokuša padati. Posljedica je povećanje toka Φ_p, napona U, i u zadnjoj liniji opet struje I. Izuzev mala odstupanja ostaje dakle vrijednost korisne struje I konstantna, ako ne mijenjamo nezavisnu uzbudnu struju i. To vrijedi osobito s obzirom na brzinu vrtnje stroja, koju možemo mijenjati u širokim granicama, a da se struja potrošača, koju daje Rosenbergov stroj, bitno ne mijenja. Na tom se osniva primjena stroja kao generatora za vagonsku rasvjetu. Slijedeće formule daju dublji uvid u ponašanje stroja:

napon na stezaljkama $A - B = I \cdot R' = C \cdot n \cdot \Phi_p - I \cdot R$,
napon na stezaljkama $a - b = 0 = C \cdot n \cdot \Phi_u - I_p \cdot R$,
tok u uzdužnoj osi $\Phi_u = L_u \cdot (i_n \cdot w_n - I \cdot w'_a)$,
tok u poprečnoj osi $\Phi_p = L_p \cdot (w'_a \cdot I_p)$,

gdje znači: R otpor armature, R' otpor opterećenja, L_u magnetsku vodljivu vrijednost u uzdužnoj osi, dakle u smjeru glavnih polova, L_p magnetsku vodljivu vrijednost u poprečnoj osi, i w'_a kao gore broj zavoja armature reduciran na namot glavnih polova. C je konstanta stroja, a n brzina vrtnje u okr/min. Preinačivanjem dobivamo jednadžbe:

$$I \cdot (R + R') = C \cdot n \cdot L_p \cdot w_a' \cdot \frac{C \cdot n \cdot \Phi_u}{R},$$

$$= C^2 \cdot n^2 \cdot L_p \cdot L_u \cdot \frac{w_a'}{R} \cdot (i_n \cdot w_n - I \cdot w_a'),$$

iz kojih konačno izlazi:

$$I = i_n \cdot \frac{w_n}{w_a'} \cdot \frac{C^2 \cdot n^2 \cdot L_p \cdot L_u}{C^2 \cdot n^2 \cdot L_p \cdot L_u + \frac{R}{w_a} \cdot \frac{R + R'}{w_a'}}.$$

Vidimo dakle, da struja ostaje nezavisna o brzini vrtnje i onda, kad se magnetska vodljiva vrijednost mijenja zbog pojava zasićenja, ako je otpor armature R neznatan. U tom je slučaju vrijednost razlomka jednaka 1. No kako R ipak ima konačnu vrijednost, to će struja I kod malih brzina vrtnje, kada je n^2 maleno, padati, i kad se stroj zaustavi, bit će naravno nula. Sl. 141c prikazuje struju u zavisnosti o brzini vrtnje. Vrlo često upotrebljavamo Rosenbergov stroj kao svarni stroj. U tom slučaju dobiva serijsku uzbudu te ga gonimo konstantnom brzinom vrtnje. Karakteristika napona na stezaljkama nakon početnog uspona naglo pada, te je možemo različitim mjerama prilagoditi postojećim potrebama.

c) Motori

Poredni motor. Ako je istosmjerni poredni motor (spoj prema sl. 142a) priključen na mrežu konstantnog napona U, nema razlike u ponašanju motora s nezavisnom uzbudom ili sa samouzbudom, jer u oba slučaja uzbudna struja i ne zavisi o struji armature I. Ispitivanje motora kod opterećenja je zato jednako. Pojimo ga iz mreže i opterećujemo ispitnim istosmjernim strojem. Zbog slabljenja polja, koje izaziva reakcija armature zbog zasićenja polnih nastavaka kao i djelovanje pomoćnih polova, moramo kod većih strojeva sa četkicama u neutralnoj zoni gotovo uvijek očekivati stanovitu nestabilnost, koja se očituje kao povećanje brzine vrtnje kod opterećenja. Zbog opreznosti pomaknut ćemo zato u početku mjerenja nosač četkica malo naprijed, da bismo ga kasnije, ako se motor ponaša stabilno, po mogućnosti vratili u neutralni položaj. Motori s kompenzacionim namotom su stabilni. Ne treba zaboraviti, da i onaj poredni motor, koji je sam po sebi nestabilan, može u ispitnoj stanici raditi posve stabilno, ako karakteristika samog izvora napona pada. Na licu mjesta može međutim zatajiti, ako je tamo mreža vrlo kruta (ispravljač). Motor smatramo stabilnim, kad mu brzina vrtnje neprestano pada, dok opterećenje raste, a regulacija polja ostaje nepromijenjena, ili kad uzbudnu struju treba neprestano smanjivati, dok opterećenje raste, da bi brzina vrtnje ostala nepromijenjena. Naprotiv, ako se brzina vrtnje povećava već kod djelomičnog opterećenja, onda moramo općenito prigovoriti, da je motor nestabilan. To isto vrijedi, ako moramo pojačati uzbudnu struju kod konstantne brzine, kad motor treba da preuzme veće opterećenje. Nestabilnost možemo većinom ublažiti ili odstraniti pomicanjem četkica naprijed ili, kod motora za oba smjera vrtnje, slabljenjem komutacionog

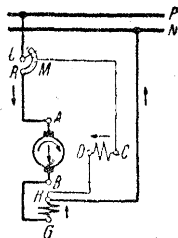
polja. Veći uspjeh možemo postići serijskim namotom od nekoliko zavoja, a bitni uspjeh kompenzacionim namotom, koji katkada ne treba da ima strujni oblog jednak onome armature, već samo oko polovinu toga. Stabilizacija otpornicima u seriju s armaturom nije ekonomična, ali je izvediva jednostavnim sredstvima.

Osnovna jednadžba za brzinu vrtnje motora kod opterećenja je ova:

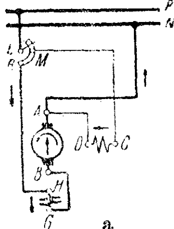
$$n_{(I)} = n_0 \cdot \frac{U - I \cdot R}{E_{(n_0, I)}},$$

u kojoj znači: U narinuti, konstantni napon mreže, I struju armature, R ukupni otpor kruga armature, n_0 brzinu vrtnje u praznom hodu, i napokon $E_{(n_0, I)}$ onu EMS, koja bi se inducirala u stroju kod brzine vrtnje n_0 u praznom hodu, uzimajući u obzir faktičnu uzbudu i reakciju armature zbog struje I. Kad ne bi bilo reakcije armature, razabiramo, da bi očito $E_{(n_0, I)}$ moralo ostati konstantno, te bi brzina vrtnje kod opterećenja zavisjela samo o djelatnom padu napona armature. No kako polje stroja, čim poteče motorska struja, zbog reakcije armature oslabi, padat će $E_{(n_0, I)}$ kad bude struja rasla. Ako to opadanje bude u istoj mjeri, u kojoj se smanjuje napon zbog djelatnih otpora, razlomak u gornjoj jednadžbi ne će se promijeniti i brzina vrtnje motora ne će pasti. Pada li $(U - I \cdot R)$ brže od EMS, kao što je to slučaj kod malih motora ispod 10 kW, brzina vrtnje će padati. Ako pak preteže slabljenje polja zbog

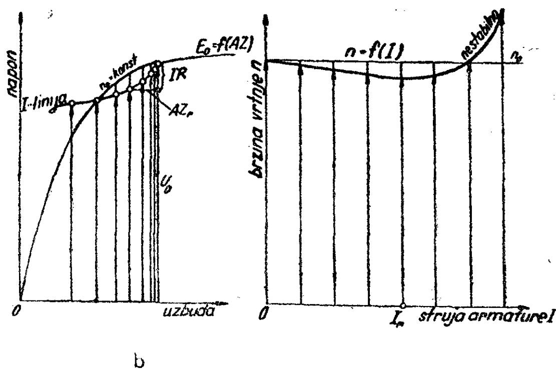
Desni smjer vrtnje



Lijevi smjer vrtnje



a



b

Sl. 142. Poredni motor. Spoj (a) i karakteristika brzine vrtnje $n = f(I)$ (b) i (c) uzimajući u obzir faktičnu, kvadratično promjenljivu reakciju armature.

reakcije armature, to će EMS padati brže nego $(U - I \cdot R)$ i brzina vrtnje će rasti. Zbog prije spomenute kvadratične zavisnosti reakcije armature o struji I, uz male struje do cca polovine opterećenja, bit će kod mnogih motora utjecaj djelatnog pada napona veći, t. j. brzina vrtnje motora padat

će od praznog hoda do polovine opterećenja. Preko toga preteže reakcija armature. To će izazvati porast brzine vrtnje dalje do punog opterećenja i preko toga. To se razabira iz grafičkog prikaza na sl. 142b, c. Ako pomicanjem četkica naprijed kompenziramo reakciju armature kod punog opterećenja, izazvat će to, prirodno, pojačani pad brzine vrtnje kod malog opterećenja.

Regulacija brzine vrtnje porednog motora. Razlikujemo dva osnovna načina regulacije brzine vrtnje istosmjernih motora: regulaciju promjenom napona armature i regulaciju slabljenjem polja. Prvi zahtijeva nezavisno uzbuđeni stroj, drugi je izvediv kod stroja s nezavisnom uzbudom i sa samouzbudom.

Regulaciju promjenom napona armature izvodimo većinom u Leonardovu spoju ili rjeđe u spoju s dodatnim strojem. Kod Leonardova spoja motor bilo koje vrste (istosmjerni, sinhroni, asinhroni, Diesel-motor) tjera istosmjerni generator, kojemu se uzbudna struja može udesiti od nule, odnosno minimalne vrijednosti do pune vrijednosti magnetskim regulatorom ili regulacijom napona uzbudnog stroja. Napon je dakle promjenljiv u širokim granicama. Na taj napon priključujemo motor, koji treba regulirati. Uzbudnu struju dovodimo mu od stranog izvora i držimo je konstantnom. Brzina vrtnje motora u praznom hodu, a približno i kod opterećenja, mijenja se proporcionalno s dovedenim naponom. Ne treba zaboraviti, da motor koji reguliramo, radi uvijek s punim tokom, bez obzira na priključeni napon. Reakcija armature je stoga jednaka u čitavom području. U svrhu stabilizacije motora često snabdijevamo Leonardov generator dodatnim serijskim namotom, koji slabi polje.

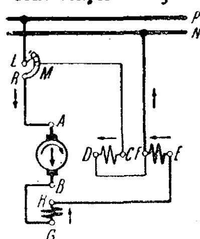
Regulacija brzine vrtnje slabljenjem polja može se provesti samo u znatno manjem području, pri čemu se većinom ograničujemo na 1 : 3, rjeđe na 1 : 4. Magnetski tok sve više slabimo, kad treba brzinu povećati. Kod velikih brzina vrtnje radimo dakle sve više u nezasićenom dijelu magnetske karakteristike. Zbog toga se i reakcija armature znatno mijenja, i to općenito još raste. No to znači, da raste opasnost nestabilnosti kod motora s oslabljenim poljem, koji je katkada još sklon i da pobjegne. Još jednu osnovnu opasnost predstavlja sve veći *maksimalni lamelni napon,* koji kod slabljenja polja jako raste, i zbog kojega moramo kod velike brzine vrtnje često znatno reducirati jakost struje. Pod maksimalnim lamelnim naponom razumijevamo najveći napon, koji se može pojaviti između dvije lamele. Zbog deformacije polja kod opterećenja bit će lamelni napon ispod prednjeg brida pola motora, koji je jako zasićen, znatno viši od srednjeg napona ispod polnog luka.

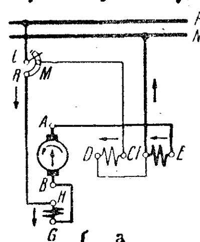
Kod regulacije brzine vrtnje promjenom napona ostaju magnetski tok i dozvoljena struja armature nepromijenjeni. No to znači, da snaga

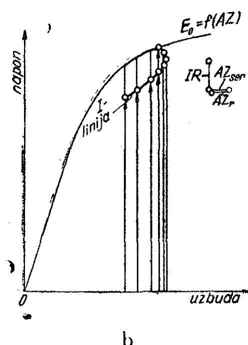
stroja raste u istoj mjeri, kako raste brzina, ili da zakretni moment zadržava konstantnu vrijednost, nezavisno o regulaciji. Motor je dakle dolje i gore jednako dobro iskorišten.

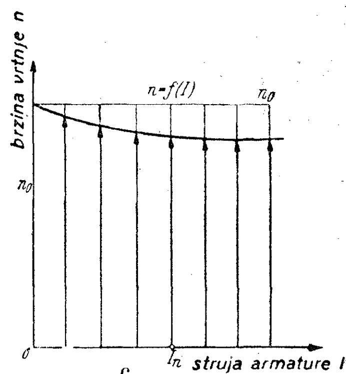
Kod regulacije brzine vrtnje slabljenjem polja, slabi i magnetski tok. Uz nepromijenjenu jakost struje ostala bi dakle snaga konstantna, a zakretni moment bi padao s rastućom brzinom vrtnje. U stvari međutim moramo obično smanjiti struju, zbog čega pada i snaga motora s rastućom brzinom, a zakretni moment prema tome pada još jače. Iskorištenje motora je dakle to slabije, što više podižemo brzinu vrtnje slabljenjem polja. To znači, da moramo motor znatno predimenzionirati, ako zahtijevamo stanovitu snagu kod velike brzine vrtnje. Regulacija slabljenjem polja prikladna je dakle osobito tamo, gdje tražimo doduše veliku brzinu, ali pri jako smanjenom zakretnom momentu.

Poredni motor s dodatnim serijskim namotom (kompaundni motor). Zbog stabilizacije vrlo često snabdijevamo veće motore, koje iz ekonomskih razloga još ne izvodimo s kompenzacionim namotom dodatnim serijskim namotom s malo zavoja. Spoj je prikazan na sl. 143a. Kako taj namot jača polje, pasti će brzina vrtnje, kad motor opteretimo. Ispitivanje može-







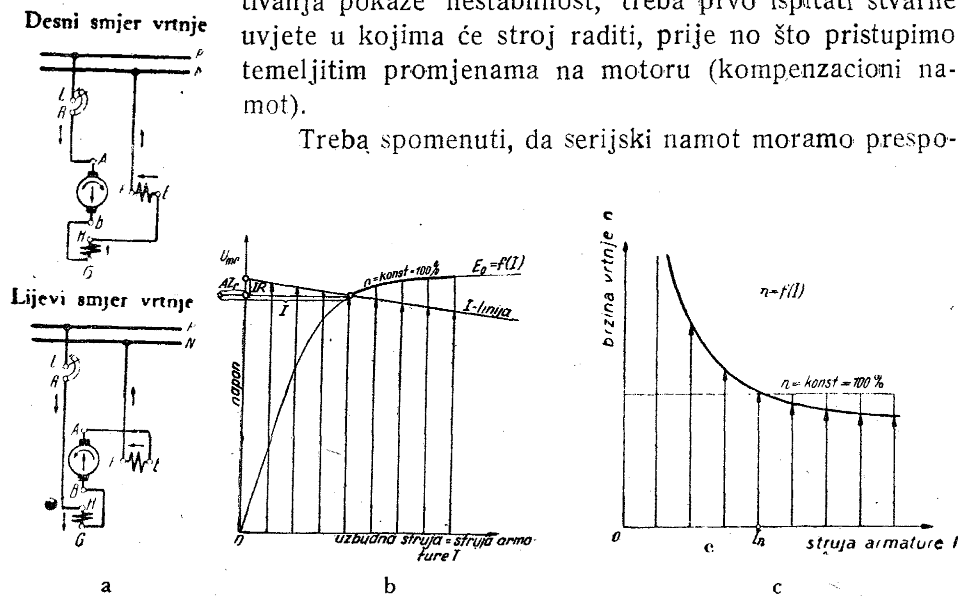


Sl 143. Poredni motor s dodatnim serijskim namotom. Spoj (a) i karakteristika brzine vrtnje $n = f(I)$ (b) i (c), uzimajući u obzir faktičnu, kvadratično promjenljivu reakciju armature.

mo dakle izvršiti po bilo kojoj metodi. Prvo treba, naravno, ispitati ispravni smisao serijskog namota, bilo induktivnom metodom prema str. 8, bilo tako, da oprezno opterećujemo motor promatrajući pažljivo brzinu vrtnje. Ako ova ostaje konstantna ili ako raste s opterećenjem, to serijski namot djeluje suprotno. Ako pak znatno opada, onda djeluje ispravno. Grafički možemo vrlo točno i brzo odrediti karakteristiku brzine vrtnje prema uputi u sl. 143b, c.

Kod velikih motora s normalnim rasporom može reakcija armature iznad $^3/_4$ opterećenja biti već tako velika, da motor više ne možemo stabilizirati ni bilo kako jakim dodatnim serijskim namotom. Karakteristika brzine vrtnje, koja u početku vrlo jako pada, zakreće kod $^3/_4$ do $^1/_1$ opterećenja, i kod većih opterećenja raste. Takav se stroj pokazuje neupotrebljivim na krutoj mreži, no s Leonardovim generatorom, koji ima silaznu karakteristiku napona, može posve stabilno raditi. Ako se dakle kod ispitivanja pokaže nestabilnost, treba prvo ispitati stvarne uvjete u kojima će stroj raditi, prije no što pristupimo temeljitim promjenama na motoru (kompenzacioni namot).

Treba spomenuti, da serijski namot moramo prespojiti, kad mijenjamo smjer vrtnje motora, što vršimo preklapanjem polariteta armature, da bi zadržao svoje djelovanje u smislu jačanja polja.



Sl. 144. Serijski motor. Spoj (a) i karakteristika brzine vrtnje $n = f(I)$ (b) i (c).

Serijski motor. Serijski motor ima samo jedan uzbudni namot, kroz koji teče struja armature. Spoj je prikazan na sl. 144a. Magnetski tok motora zavisi dakle o opterećenju, pa brzina vrtnje jako pada, kad struja armature raste. Općenito govorimo o serijskom ponašanju. Prazni hod serijskog motora nije moguć, jer rasterećeni motor teži teoretski neizmjerno velikoj brzini vrtnje, a praktički pobjegne prema brzini vrtnje, koja nije dopustiva iz mehaničkih razloga. Ispitivanje treba zato provoditi s potrebnim oprezom, kako bismo izbjegli svako neželjeno rasterećenje. Najbolje je da motor tjeramo nezavisno uzbuđen, tako da isključimo uzbudni namot iz strujnog kruga armature, te ga pojimo iz stranog izvora preko regulacionih otpornika. Udešavamo li uzbudnu struju uvijek na vrijednost jednaku struji armature, dobit ćemo iste točke opterećenja kao kod normalnog rada, ali sa strojem, koji se ponaša kao poredni. Kako je gdjekada teško dobiti i regulirati veliku uzbudnu struju, to smo katkada

ipak prisiljeni provesti ispitivanje u normalnom spoju. Najbolje je da onda opterećujemo s ispitnim generatorom, koji opet radi na otpornike. Ove udesimo unaprijed tako, da stroj za opterećenje uz nominalnu uzbudu bude opterećen otprilike s nominalnom snagom ispitivana motora. Prije nò što ćemo pokrenuti serijski motor, uključimo uzbudu stroja za opterećenje. Motor, koji kreće, bit će dakle odmah opterećen, te će nakon kratkog spajanja pokretača ići otprilike s nominalnom brzinom vrtnje. Regulacijom otpornika za opterećenje i uzbudne struje generatora možemo oprezno udesiti i očitati daljnje točke opterećenja. Većinom je propisana najveća brzina vrtnje kod rasterećenja, koju ćemo udesiti daljnjim rasterećivanjem. Kod propisanog pokusa s povećanom brzinom vrtnje, koja je još 20% veća od maksimalne pogonske, treba osobito pažljivo postupati, jer kod odviše nagla rasterećenja serijskog motora lako dolazi do preskoka na kolektoru. Da motor ne bi kod potpunog rasterećenja pobjegao, možemo ga zaštititi centrifugalnom sklopkom, koju treba udesiti na predviđenu brzinu isklapanja također u ispitnoj stanici.

Brzinu vrtnje puno opterećena stroja možemo u stanovitoj mjeri regulirati, prema onome, što je prije rečeno, odvajanjem uzbudne struje. U tu svrhu potreban je niskoomski otpornik paralelno s uzbudnim namotom, koji se može udešavati u jednom ili više stepena. Ovaj način slabljenja polja rijetko upotrebljavamo.

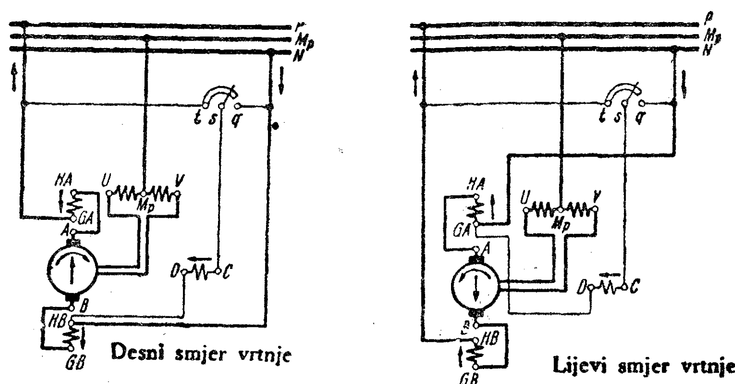
Motore za vozila i dizala možemo ispitivati zajedno s rasklopnim spravama, tako da ih opterećujemo zamašnim masama, koje treba da pokrenu. Na taj način dobivamo ispitivanje, koje odgovara faktičnom pogonskom stanju.

Grafičko određivanje karakteristike brzine vrtnje vidimo na sl. 144b. Karakteristika brzine vrtnje bez deformacije nanijeta je u sl. 144c u zavisnosti o struji. Često se daje brzina vrtnje u zavisnosti o zakretnom momentu. U tu svrhu izračunamo prema podacima na str. 208 za svaku struju I i pripadnu EMS E' kod n' okr/min zakretni moment: $M = (E'/n') \cdot (I/1{,}03)$, te nanosimo iznad toga faktičnu brzinu vrtnje n.

d) Dioba napona

Mreže s tri vodiča, s punim naponom između vanjskih vodiča, i polovinom napona između svakog vanjskog i srednjeg vodiča, pojimo ili jednim jedinim strojem s diobom napona ili t. zv. agregatima za izjednačenje. Prikladnom raspodjelom potrošača nastojimo postići, da obje polovine mreže budu jednoliko opterećene i time po mogućnosti rasteretiti srednji vodič. Na taj način uspijevamo ograničiti njegovu struju na 15 do 25% struje vanjskih vodiča. Strojeve treba onda dimenzionirati za tu struju.

Istosmjerni stroj s diobom napona. Na sl. 145 prikazan je spoj istosmjernog generatora za diobu napona. Odvojci na namotu armature s dvije točke, razmaknute točno za 180°, spojeni su na dva klizna koluta. Strojevi s više točaka istog potencijala (petljasti namot!) imat će odgovarajući veći broj spojeva na klizne kolute. Na kolute je izvana priključena prigušnica, a odvojak iz njezine sredine je priključna točka srednjeg vodiča. Struja srednjeg vodiča dijeli se na obje polovine prigušnice i teče preko kliznih koluta u namot armature.



Sl. 145. Trovodni poredni generator s dvofaznim djelilom napona (prigušnica).

Ispitivanje vršimo kao kod svakog normalnog stroja, te ga samo nadopunjujemo mjerenjem napona na kliznim kolutima u praznom hodu. Kod strojeva sa dva koluta uz sinusno polje iznosi ovaj napon teoretski $0{,}5 \cdot \sqrt{2}$, no u stvari cca 0,75 istosmjernog napona. Ako namot armature nema točaka za odvojke, razmaknutih točno za 180°, kao što je to slučaj na pr. kod valovitog namota, odaberemo tri točke, razmaknute za 120°, koje onda spojimo na tri klizna koluta. Diobu napona izvodimo onda trofaznom prigušnicom. Napon između koluta iznosi teoretski $0{,}5 \cdot \sqrt{2} \cdot 0{,}5 \cdot \sqrt{3} = 0{,}61$, no u stvari cca 0,65 istosmjernog napona. Kod pogrešnog priključka kliznih koluta superponira se nultočki mali izmjenični napon, koji — kod ne baš prevelike frekvencije — dovodi do treperenja žarulja priključenih između vanjskih i srednjeg vodiča. Zato kod stroja s diobom napona izvodimo još i pokus treperenja sa žaruljama, opisan na str. 229.

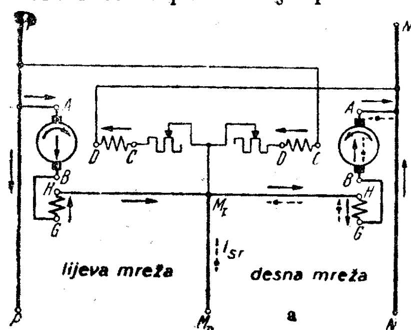
Agregati za izjednačenje. Agregati za izjednačenje služe za diobu napona kod već postojeće mreže, koja se često poji iz trofazne mreže preko ispravljača. Sastoje se od dva potpuno jednaka, spojkom spojena istosmjerna poredna stroja, koji su često opremljeni s jednim ili sa dva dodatna serijska uzbudna namota. Sl. 146a prikazuje najjednostavniji spoj,

bez kompaundne uzbude. Kad srednji vodič nije opterećen, oba stroja idu kao motori u praznom hodu. Puni napon mreže dijeli se po pola na stezaljke jednog i drugog stroja. Opteretimo li jednu polovicu mreže jače, prelazi tamo priključeni stroj za izjednačenje u generatorski rad, dok drugi postaje motor. Struja motora I_{mot} i struja generatora I_{gen} daju zajedno struju srednjeg vodiča I_{sr}. Zbog neizbježivih gubitaka I_{mot} je veće od I_{gen}. Točno vrijedi:

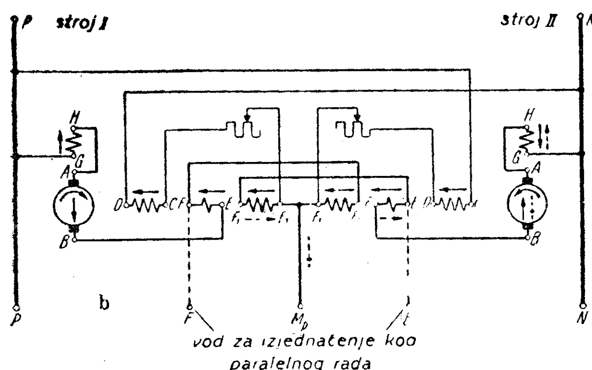
$$I_{mot} + I_{gen} = I_{sr} \,,$$

$$I_{mot} \cdot \eta_{mot} = I_{gen}/\eta_{gen} \,,$$

u koliko su naponi obiju polovica mreže međusobno jednaki.



Naponi mreže nešto će se promijeniti zbog većeg opterećenja jedne strane, i to na jače opterećenoj strani napon će nešto pasti, dok će napon druge polovine mreže porasti. Zbog toga spajamo uzbudne namote unakrst. Generator dobiva dakle pojačanu uzbudnu struju te mu napon opet nešto poraste. Motor dobiva slabiju uzbudnu struju, njegova brzina vrtnje raste. Oboje djeluje u smislu boljeg održavanja konstantnog napona.

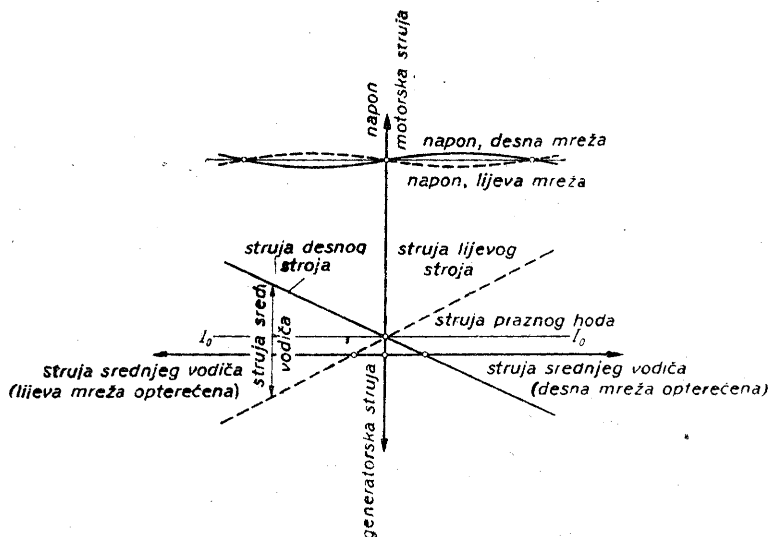


Sl. 146. Agregat za izjednačenje. Agregat s unakrsno uzbuđenim porednim namotom (a), i dvostruko kompaundirani agregat za zalet bez pokretača (b). (Namo E_1F_1 je jači od namota EF). Izvučene strelice = motorska struja kod zaleta i u praznom hodu, ako je $I_{sr} = 0$. Crtkane strelice = generatorska struja, ako desnu mrežu jače opteretimo.

Kompaundiranjem strojeva može se to još znatno poboljšati. Vrlo je dobar spoj prikazan na sl. 146b. Svaki stroj ima po jedan manji serijski namot, kroz koji teče vlastita struja, i jedan veći serijski namot, kroz koji teče struja armature drugog stroja. Rezultira pojačanje polja kod generatora, dok polje motora, zbog različitih brojeva zavoja i struja armature, ostaje praktički nepromijenjeno. Naponi obiju polovina mreže mijenjaju se od neopterećenog do puno opterećenog srednjeg vodiča samo za 1% do 2%. Prednost dvostruko predviđenih serijskih namota je u mo-

gućnosti, da pokrenemo agregat bez pokretača. Za vrijeme zaleta teče ista motorska struja I_{r_0} u oba stroja i u sva četiri serijska namota. Kako vidimo, svi oni djeluju u smislu jačanja polja, a time i zakretnog momenta. Struja, koju agregat uzima, ograničena je time na podnosivu mjeru, jer je sam zalet skraćen na dijelove sekunde.

Agregate za izjednačenje ispitujemo u ispitnoj stanici. Prvo odredimo karakteristiku praznog hoda obaju strojeva povećavajući vrijednosti uzbudne struje, i održavajući najpomnije konstantnu brzinu vrtnje. Obje se krivulje moraju potpuno podudarati. Ako jedna od druge ponešto odstupa, treba ih točno izjednačiti mijenjajući raspor. Zatim snimamo krivulje opterećenja za stroj kao motor i kao generator, uz pravi smjer vrtnje svakog



Sl. 147. Karakteristike kompaundiranog agregata za izjednačenje.

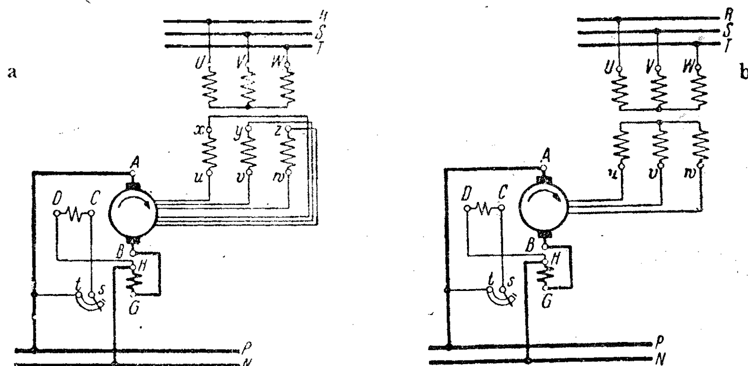
stroja. Ne treba zaboraviti, da se jedan okreće desno, drugi lijevo. Krivulje opterećenja moraju se točno podudarati. Možebitna, ma i malena odstupanja, odstranit ćemo pomičući četkice na jednom od strojeva. Kako su agregati za izjednačenje skloni da pobjegnu, to redovito već prije pomaknemo četkice obaju strojeva za ½ do 1 lamele naprijed.

Kada smo oba stroja na taj način ispitali i udesili, spojimo ih konačno međusobno, pošto smo prethodno odredili induktivnom metodom pravi smisao namatanja kompaundnih namota. Opterećujemo najbolje otpornikom, koji je dimenzioniran za punu struju srednjeg vodiča, jednaku sumi nominalnih struja motora i generatora, i za napon jednog stroja. Taj otpornik preklapamo preklopkom od jednog stroja na drugi. Na taj način možemo reproducirati prilike rada za agregat u praznom hodu, kao i po izboru za lijevo ili desno opterećenu mrežu. Ne treba zaboraviti, da struja u objema armaturama i u otporniku mijenja smjer kod preklapanja otpor-

nika. Mjerimo napone na obje armature, ukupni napon, koji držimo po mogućnosti konstantnim, i tri struje I_{vod}, I_{sen}, i I_{t}. Rezultat prikazujemo kao na sl. 147. Grane krivulja lijevo i desno moraju se međusobno podudarati. Mijenjajući brzinu vrtnje agregata možemo utjecati na prilike zasićenja, i gdjekada još poboljšati diobu napona od praznog hoda do punog opterećenja srednjeg vodiča.

E. JEDNOARMATURNI PRETVARAČ

Sastav. Jednoarmaturni pretvarač predstavlja sjedinjenje sinhronog i istosmjernog stroja. Stator ima istaknute polove, koji većinom nose samo poredni samouzbudni namot, rjeđe imaju nezavisnu uzbudu. Gdjekada predvidimo slabi serijski namot. U polnim nastavcima leže prigušni štapovi, koji su veznicima ili prstenima povezani u zatvoreni kavez.



Sl. 148. Spoj šesterofaznog (a) i trofaznog (b) jednoarmaturnog pretvarača

Pomoćni polovi ističu se osobito velikim rasporom, koji je uvijek podijeljen na unutarnji raspor uz armaturu i vanjski raspor uz jaram. Broj zavoja redovito im je manji nego kod istosmjernog stroja, jer se *AZ* armature u međupolnom prostoru dobrim dijelom ukidaju. Računamo, da preostaje polje armature od cca 14% kod rada trofazna-istosmjerna struja, a cca 20% kod obrnutog rada.

Rotor je građen kao normalni rotor istosmjernog stroja. Namot je priključen na kolektor. Jednoliko porazdijeljeni odvojci vode do kliznih koluta. Kod sinhrone brzine dobivamo na kolektoru istosmjerni napon, a na kliznim kolutima izmjenični napon.

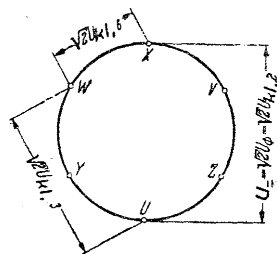
Po svojem sastavu jednoarmaturni pretvarač je sposoban da radi kao sinhroni generator, kao sinhroni motor, kao istosmjerni generator, kao istosmjerni motor ili pak istovremeno kao sinhroni i istosmjerni stroj.

Primjenjujemo ga gotovo isključivo kao pretvarač primljene snage izmjenične struje u snagu istosmjerne struje. U tom slučaju radi istovre-

meno kao sinhroni motor i istosmjerni generator. Dalje ćemo pretpostavljati ovu vrst rada, uz upotrebu trofazne struje na izmjeničnoj strani. Rjeđe ga upotrebljavamo za pretvorbu istosmjerne struje u izmjeničnu. U tom slučaju govorimo o povratnom radu.

Kao dvostrujni generator, koji daje izmjeničnu i istosmjernu struju, te zahtijeva strani pogon, primjenjujemo ga tek iznimno, te nema praktična značenja.

Sl. 148 prikazuje spoj pretvarača.



Sl. 149. Naponi idealnog pretvarača sa sinusnom raspodjelom polja. Dužine tetiva između odvojaka daju nam mjeru za *tjemene* vrijednosti napona, koje tamo dobivamo, ako promjer uzmemo jednak istosmjernom naponu, odnosno *efektivne* vrijednosti, ako promjer uzmemo jednak istosmjernom naponu, podijeljenu s $\sqrt{2}$. $U_{kl,6}$ vrijedi za šesterofazni, $U_{kl,3}$ za trofazni, a $U_{kl,2}$ za jednofazni pretvarač.

Prijenosni omjer. Omjer izmjeničnog napona na kliznim kolutima prema istosmjernom naponu na kolektoru konstantan je, ako zanemarimo mali pad napona, jer oba napona inducira isto polje u istom namotu. Ako polazimo od sinusno raspodijeljenog polja, možemo napon na kolektoru i između dva bilo kako smještena odvojka prikazati kao promjer i kao tetivu kružnice. Sl. 149 daje prikaz za jednofazni, trofazni i šesterofazni pretvarač. Kako kod izmjeničnog napona navodimo efektivnu vrijednost, izlazi on u prikazu, koji daje maksimalne vrijednosti, $\sqrt{2}$ puta prevelik. Efektivne vrijednosti dobivamo, ako dijametralni napon uvrstimo kao istosmjerni napon, podijeljen s $\sqrt{2}$. Odavle dobivamo naponski prijenosni omjer k_U

$$k_U = \frac{\text{napon između dva susjedna odvojka}}{\text{istosmjerni napon}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sin\left(\frac{180^0}{\text{broj kliznih koluta}}\right).$$

Kod nesinusne raspodjele polja treba ovu vrijednost pomnožiti faktorom Φ_1/Φ, gdje je Φ_1 osnovni val toka, a Φ tok. Broj kliznih koluta podudara se s brojem faza, osim u slučaju jednofaznog pretvarača. Gornja formula vrijedi međutim i za taj slučaj.

Napon između dvije točke namota armature, razmaknute međusobno za 180° el, nazivamo dijametralni napon $U_\varnothing$. On je nezavisan o broju faza, te ga izračunavamo:

$$\text{dijametralni napon} = \frac{\text{istosmjerni napon}}{\sqrt{2}} = 0{,}707 \cdot \text{istosmjerni napon},$$

$$U_\varnothing = \frac{U_=}{\sqrt{2}}.$$

Kod šesterofaznog pretvarača, koji se daleko najviše gradi, pojavljuje se dijametralni napon između koluta U i X, V i Y, W i Z, ako su svi priključci razmaknuti kao obično za 60^0 el. U, V, W kao i X, Y, Z razmaknuti su među sobom uvijek točno za 120^0 el. Jedino kod serijskih namota nisu U i X i ostali odgovarajući koluti razmaknuti točno za 180^0 el, jer pripadne točke namota nemamo na istoj strani rotora.

Struja na kliznim kolutima sastavljena je od djelatne struje, koja odgovara pretvorenoj djelatnoj snazi, i jalove struje, koja pripada jalovoj snazi, uzetoj ili predanoj na strani izmjenične mreže. Kod stroja, zamišljenog bez gubitaka, dakle uz $\eta = 100\%$, mora djelatna snaga izmjenične struje biti jednaka snazi istosmjerne struje. Prema tome vrijedi:

$$m \cdot \frac{U_\Phi}{2} \cdot I_{kl} \cdot \cos\varphi = U_= \cdot I_=,$$

a odavle dobivamo

$$I_{kl} = I_= \cdot \frac{2\sqrt{2}}{m \cdot \cos\varphi}.$$

Pri tome znači: m broj kliznih koluta (iznad 2 dakle i broj faza), U_Φ dijametralni napon, I_{kl} izmjeničnu struju, koja izvana dolazi na klizne kolute, $\cos\varphi$ faktor snage, $U_=$ i $I_=$ napon i struju na istosmjernoj strani.

Jalova struja, naravno, ne zavisi o veličini istosmjerne struje. Možemo je po volji udesiti preuzbudom ili poduzbudom, kao kod svakog sinhronog stroja, ako postoji kruta izmjenična mreža. Prednost dajemo radu uz $\cos\varphi = 1$ u mreži, pri čemu dakle jalova struja u mreži iščezava, no pretvarač mora dati struju magnetiziranja za transformator, preko kojega je redovno priključen. Stroj tada radi nešto preuzbuđen sa $\cos\varphi$ od cca 0,97 do 0,95.

Pretvarač pojimo isključivo preko transformatora, koji treba da transformira napon mreže na vrijednost napona kliznih koluta, koja je određena traženim istosmjernim naponom, te da izvrši promjenu broja faza. Normalni trofazni transformator možemo upotrebiti kod ulančenog sekundarnog namota, da poji pretvarač trofazno, a kod otvorenog sekundarnog namota, da ga poji šesterofazno. Dvanaest sekundarnih faza možemo dobiti s pomoću dva transformatora, koji su primarno spojeni u trokut i u zvijezdu. Dvanaesterofazni pretvarač nije ni od kakve važnosti.

Struju, koju daje trofazna mreža, možemo izračunati uzevši u obzir $\cos\varphi$ mreže i ukupnu korisnost η:

$$I_{mr} = \frac{U_= I_=}{\sqrt{3} \cdot U_{mr} \cdot \eta \cdot \cos\varphi}.$$

Praktičke vrijednosti prijenosa. Zbog nesinusne raspodjele polja, kao i gubitaka, koji nastaju, vrijede slijedeći prijenosi za struju i napon pretvarača kod rada izmjenična-istosmjerna struja, koji nešto odstupaju od teoretskih vrijednosti:

broj koluta	2	3	6
broj faza	1	3	6
$k_U = U_{kl}/U_=$	0,75	0,65	0,375
$k_{U\Phi} = U_\Phi/U_=$	0,75	—	0,75
$k_I = I_{kl}/I_=$	1,414	0,943	0,472

Strujni prijenosni omjer vrijedi za srednju korisnost od 95% i cos $\varphi = 1,0$ na kliznim kolutima.

Brzina vrtnje jednoarmaturnog pretvarača. Ako je pretvarač priključen na izmjeničnu mrežu konstantne frekvencije, njegova je brzina vrtnje kao kod svakog sinhronog stroja:

$$n_{sin} = \frac{120}{2p} \cdot f, \qquad f = \text{frekvencija}, \; 2p = \text{broj polova.}$$

On je vezan na tu sinhronu brzinu vrtnje. Pretvarač ne reagira na promjene uzbudne struje. Ovo principijelno odstupanje od ponašanja normalnog istosmjernog stroja možemo protumačiti tako, da djelotvornu uzbudu ne daje samo uzbudni namot na polovima, u kojemu teče struja, nego k tome još i uzdužni *AZ* armature. Ovi slabe polje, kad pretvarač daje jalovu snagu u mrežu, a jačaju polje, kad je uzima.

Ove odnose poznajemo kod sinhronog stroja. Poduzbuđeni pretvarač nadoknađuje dakle uzbudne *AZ*, koji mu nedostaju, tako da uzima jalovu struju, dok preuzbuđeni pretvarač slabi svoju uzbudu time što šalje jalovu struju u mrežu. Tok je praktički konstantan, a veličinu mu određuje jedino izmjenični napon, doveden na klizne kolute.

U slučaju kad pretvarač radi na nesamostalnu izmjeničnu mrežu, koju jedino on poji, njegova brzina vrtnje nije nipošto više konstantna. Frekvencija se mijenja s njom po relaciji:

$$f = \frac{2p \cdot n}{120}.$$

Brzina vrtnje u praznom hodu ravna se po istim zakonima, koji vrijede za normalni istosmjerni motor. Uz konstantan istosmjerni napon možemo je regulacijom polja povisiti ili sniziti. Kod opterećenja potrošačima djelatne snage mijenja se brzina vrtnje tek malo. No čim pridođu potrošači jalove snage (asinhroni motori), brzina će jako porasti, jer jalova struja, koju stroj daje, djeluje razmagnetizirajući. Polje treba pojačati. U rije-

tkom slučaju, kad pojimo kondenzatore, brzina vrtnje pretvarača bi pala kod opterećenja.

Pogon istosmjerna-izmjenična struja ne nalazimo često. Kod normalnog načina rada može on neželjeno nastupiti u slučaju smetnji u izmjeničnoj mreži, koja poji pretvarač. Nestane li naime iz bilo kojeg razloga izmjenične struje, a na primarnoj strani se nalaze paralelno s pretvaračem još i drugi potrošači, kao na pr. asinhroni motori, nastupit će povratni rad, ako se održava istosmjerni napon, na pr. istosmjernim motorima. Istosmjerni motori, koji se zaustavljaju, poje preko pretvarača asinhrone motore, koji svojom jalovom strujom slabe polje pretvarača. Ovaj se zaleti. Povećanje brzine vrtnje može ga s time u vezi ugroziti, te ga zato često izbjegavamo prigradnjom centrifugalne sklopke. Ova isklopi na istosmjernoj strani.

Regulacija napona. Zbog krutog omjera između izmjeničnog i istosmjernog napona pretvarača, prenose se sva kolebanja napona mreže, koja poji, u punoj mjeri u pojenu mrežu. Često je zato poželjna regulacija napona. Možemo je ostvariti u principu na četiri različita načina, od kojih međutim ima značenje samo regulacija prigušnicama i ona s pomoću zakretnog transformatora, dok pretvarač s dodatnim strojem i onaj s rascijepljenim polovima nemaju više značenja.

D o d a t n i s t r o j: U seriju s pretvaračem uključimo na izmjeničnoj ili na istosmjernoj strani dodatni stroj, u kojemu teče puna struja, a napon mu možemo regulirati između pozitivne i negativne maksimalne vrijednosti. Ako je ovaj stroj gonjen od samoga pretvarača, kao što je slučaj kod sinhronog dodatnog stroja, to ovaj mora dati motorski ili generatorski moment. Pojavljuje se odgovarajuće poprečno polje armature, što osjetljivo smeta komutaciju, ako nismo poduzeli posebne mjere. Ove dodatne strojeve ne gradimo više.

P r i g u š n i c a: Pri razmjerno uskom području regulacije najbolje je priključiti pretvarač na izmjeničnoj strani preko prigušnice. Pad napona u njoj zbog djelatne struje djeluje na napon kliznih koluta gotovo isključivo tako, da ga fazno zakreće. Pad napona zbog jalove struje leži u smjeru napona na kliznim kolutima. Kad stroj uzima jalovu snagu, dakle kod poduzbude, smanjuje se napon na kliznim kolutima, a kad predaje jalovu snagu, dakle kod preuzbude, povećava se napon na kliznim kolutima. Praktički dakle povećanje uzbudne struje izaziva povećanje istosmjernog napona, a smanjivanje struje dovodi do smanjivanja napona. Ovaj sam po sebi udoban, jednostavan i jeftin način regulacije ograničen je time, što faktor snage pretvarača postaje slabiji, zbog čega se smanjuje korisnost. Osim toga, naravno, ne možemo više po volji udesiti u mreži faktor snage

1,0. U praksi primjenjujemo često regulaciju prigušnicom. Kod regulacije za ± 5% upotrebljavamo prigušnicu sa cca 20% pada napona kod nominalne struje. Potrebna jalova struja iznosi tada cca ± 25% nominalne struje. Za regulaciju napona u praznom hodu potrebno je tada cca 50% jalove struje.

Zakretni transformator: Kod većih regulacija napona predviđamo zakretni transformator bilo na primarnoj, bilo na sekundarnoj strani transfomatora. U prvom slučaju treba da je građen za većinom vrlo visoki napon mreže, u drugom slučaju za razmjerno veliku struju na kliznim kolutima. Njegova snaga odnosi se prema snazi, koju prima pretvarač, kao (zahtijevana promjena napona na jednoj strani + polovina pada napona transformatora i pretvarača) prema (nominalni napon). To vrijedi za rad isključivo u jednom smjeru. Kod rada u oba smjera treba uvrstiti čitavi pad napona. Želimo li regulirati napon za ± 8%, a ukupni pad napona od praznog hoda do punog opterećenja iznosi 4%, to treba dimenzionirati zakretni transformator za 8 + 0,5 · 4 = 10% snage, koju uzima pretvarač. Za razliku prema regulaciji napona s prigušnicom, možemo kod toga uvijek održavati faktor snage mreže na vrijednosti 1,0. Ovaj način regulacije je tehnički najsavršeniji. Kod udešavanja zakretnog transformatora (priključak faza mreže) treba paziti na smjernice iznesene na str. 139, kako bismo postigli najmanju primarnu struju.

Pretvarač s rascijepljenim polovima ne primjenjuje se više. Kod ovoga smo deformacijom polja postizavali povećanje istosmjernog napona u omjeru prema dovedenom izmjeničnom naponu, koji se zbog nadvalova gotovo nije mijenjao.

Gubici u bakru armature jednoarmaturnog pretvarača. Za izračunavanje gubitaka u bakru armature pretvarača ne vrijede više uobičajene jednadžbe, osim u slučaju, da teče čisto jalova struja. Zbog superpozicije izmjenične i istosmjerne struje smanjuju se gubici uzrokovani djelatnom strujom, dok gubici proizvedeni jalovom strujom ostaju jednako veliki. Ako promatramo sa *strane izmjenične struje*, možemo gubitke izraziti:

$$N_{Cu_a} = m \cdot v' \cdot R_f \; I_r^2 + m \cdot R_f \cdot I_j^2,$$

gdje znači:

m broj koluta,

I_r djelatna struja po kolutu,

I_j jalova struja po kolutu,

R_f otpor zamišljene faze u spoju zvijezda = $R_= : (m \cdot \sin^2 \pi/m)$, uz $R_=$ = otpor armature s istosmjerne strane,

v' faktor redukcije < 1.

Za faktor redukcije dobivamo:

$$v' \quad 1 - \left(2 - \frac{\pi^2}{8}\right) \cdot \left(\frac{\sin \frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}}\right)^2 =$$

0,69	za	2	koluta
0,48	„	3	„
0,38	„	4	„
0,30	„	6	„
0,25	„	12	„
0,23	„	∞	„

Kod rada pretvarača uz $\cos \varphi > 0$ nastaju dakle uvijek manji gubici, nego kad bismo isti stroj s istim strujama tjerali kao sinhroni stroj. To znači, da pretvarač može dati veću snagu od sinhronog stroja istih dimenzija, ako polazimo od istih dopustivih gubitaka u bakru armature.

U praksi promatramo gubitke s obzirom na *stranu istosmjerne struje*. Budući da su R_f i $R_=$, kao i izmjenična i istosmjerna struja neposredno povezani, možemo gornju formulu za gubitke preurediti u ovu formulu:

$$Nc_{u_a} = I_=^2 \cdot R_= \cdot v,$$

pri čemu je $R_=$ = otpor između četkica, $I_=$ = istosmjerna struja i v = redukcioni faktor.

Za redukcioni faktor v dobivamo:

$$v = 1 - \frac{16}{\pi^2} + \frac{8}{\left(m \cdot \sin \frac{\pi}{m} \cdot \cos \varphi\right)^2}.$$

Za razliku od redukcionog faktora v' zavisi ovaj također i o $\cos \varphi$, pa tako ulazi u račun jalova struja, koja nije nikako izražena veličinom istosmjerne struje. Kod rada isključivo za popravljanje faze, gdje je $I_=$ jednako nuli, dobivamo stoga za v neupotrebljivu vrijednost ∞. Redovito međutim izračunavamo korisnost samo za $\cos \varphi = 1{,}0$. U ovom slučaju vrijede za v vrijednosti, koje navode i propisi (REM):

broj koluta	=	2	3	4	6	12	
broj faza	=	1	3	4	6	12	$\cos \varphi = 1{,}0$
v	=	1,38	0,56	0,38	0,27	0,21	

Ako uspoređujemo sa čisto istosmjernim radom, postaju dakle gubici uz $\cos \varphi = 1$ tek počevši od trofaznog rada povoljniji, tako da pretvarač istog tipa daje veću snagu od istosmjernog stroja. No čim $\cos \varphi$ odstupi od jedinice, kao što je to često slučaj kod regulacije prigušnicom, a i inače zbog pokrivanja struje magnetiziranja transformatora ili pretvarač treba čak da daje jalovu snagu u izmjeničnu mrežu, porast će naglo vrijednost v, kako to vidimo s krivulja na sl. 150.

Faktori redukcije su mjera za dopustivu jalovu struju u praznom hodu i za djelatni pad napona pretvarača. Vrijedi:

dopustiva jalova struja u praznom hodu

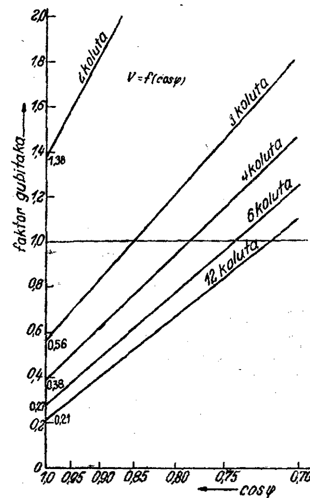
$= \sqrt{v} \cdot$ nominalna djelatna struja.

Djelatni pad napona u armaturi općenito je manji nego kod istosmjernog stroja, te iznosi:

djelatni pad napona armature

$= \sqrt{v} \cdot$ istosmjerni otpor · istosmjerna struja.

K tome pridolazi pad napona na četkicama te u namotu pomoćnih polova i eventualno serijskom namotu, koji izračunavamo normalno.

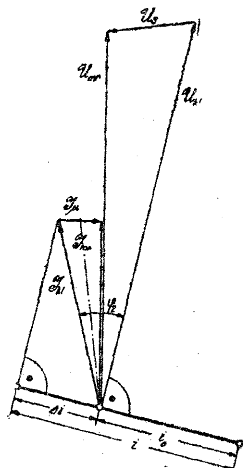


Sl. 150. Faktor gubitaka v pretvarača s obzirom na istosmjernu stranu

Dijagram jednoarmaturnog pretvarača. Pojednostavnjeni naponski i strujni dijagram prikazan je na sl. 151. Djelatni pad napona je zanemaren, suma induktivnih padova u transformatoru, prigušnici ili zakretnom transformatoru kao i mali pad u pretvaraču uzeti su u obzir zajedničkim rasipnim naponom. Ovaj je proporcionalan sa strujom na kliznim kolutima, smanjenom za polovinu struje magnetiziranja transformatora, te je na nju okomit. Razabiramo, da se uzbudna struja i, potrebna kod opterećenja, sastoji od algebarske sume uzbudne struje praznog hoda i_0 i dijela Δi, koji služi za kompenzaciju jalove struje I_j na kliznim kolutima. Kod povećanog opterećenja zamjetljivo će porasti I_j, koja je u praznom hodu jednaka struji magnetiziranja transformatora, zbog većeg faznog pomaka između napona na kliznim kolutima i napona mreže, izazvanog rasipnim naponom. Uzbudna će struja porasti stoga kod punog opterećenja i $\cos\varphi = 1{,}0$ u mreži za cca 25%. Želimo li izbjeći naknadnu regulaciju uzbudne struje, možemo predvidjeti kompaundni namot na glavnim polovima. Kod povratnog rada na izmjeničnu mrežu treba ovaj međutim odvojiti ili prespojiti na stezaljkama. On dakle, ukoliko je izveden, ne služi zapravo za održavanje konstantnog napona na četkicama, nego daleko više za održavanje konstantnog faktora snage u trofaznoj mreži.

Pokretanje pretvarača. Pokretanje s istosmjerne strane. Ako imamo na raspolaganju mrežu istosmjerne struje, možemo pretvarač pokretati na isti način kao i svaki istosmjerni stroj — pokretačem. Nakon izvršene sinhronizacije priključimo ga na izmjeničnoj strani. U slučaju da transformator na sekundarnoj strani za vrijeme pokretanja ostane trajno priključen na klizne kolute, teći će u početku jedan dio struje pokretanja

u sekundarni namot. Zbog toga će biti potrebna gotovo dvostruka struja. Priključimo li transformator još neuzbuđen na klizne kolute tek nakon svršenog zaleta, davat će pretvarač jalovu struju i iznenada će povećati brzinu vrtnje. Najbolje je stoga priključiti transformator na klizne kolute kratko vrijeme nakon početka zaleta.



Sl. 151. Dijagram pretvarača za slučaj da je u mreži $\cos\varphi = 1.0$.
($\mathcal{U}_{mr}$, $\mathcal{I}_{mr}$ = napon, struja u mreži. $\mathcal{U}_s$ = ukupni rasipni napon, stoji okomito na vektor struje $\mathcal{I}_{kl} + \frac{1}{2}\mathcal{I}_\mu$, koji je crtan -·-·-·- $\mathcal{U}_{kl}$ = napon na kliznim kolutima. $\mathcal{I}_{kl}$ = struja na kliznim kolutima. $\mathcal{I}_\mu$ = struja magnetiziranja transformatora. φ_2 = fazni pomak pretvarača. i_0 = uzbudna struja u praznom hodu za $\mathcal{U}_{kl}$, i = ukupna uzbudna struja kod opterećenja, Δi = dodatna uzbudna struja = $(0{,}8 \operatorname{tg}\varphi_2 + 0{,}15) \cdot \frac{z}{2 \; 2a \; 2p} \cdot I_=$, pri čemu je z = ukupni broj vodiča, $2a$ = broj paralelnih grana i $2p$ = broj polova.)

P o k r e t a n j e   p o m o ć n i m   s t r o j e v i m a. Obilno dimenzioniran uzbudni stroj ili posebno predviđeni asinhroni motor, koji se može na spojci odvojiti, možemo upotrebiti kao strojeve za pokretanje. Ako je broj polova asinhronog motora isti kao pretvarača, potjerat će ga samo do blizine sinhrone brzine vrtnje. U tom slučaju priključujemo pretvarač na mrežu preko prigušnice, pri čemu moramo računati s udarcem od cca 50% nominalne struje. Zatim pretvarač uzbudimo, udesimo da uzima najmanju struju, te premostimo prigušnicu.

Upotrebljavamo li motor s kliznim kolutima, možemo ga sinhronizirati tako, da pojimo rotorski namot istosmjernom strujom, te priključiti pretvarač bez udarca na mrežu. Ispravan položaj obaju rotora treba jednom točno udesiti. Ovaj sinhronizirani motor ne smijemo međutim na spojci odvojiti.

Većinom odabiramo asinhroni motor s brojem polova manjim za dva. S pomoću finostepenog rotorskog otpornika potjeramo ga točno do sinhrone brzine vrtnje pretvarača, tako da možemo ovaj lako sinhronizirati.

S a m o z a l e t. Najvažniji način pokretanja kod višefaznog pretvarača je samozalet sa strane trofazne mreže. Za to ga osposobljava ispravno dimenzioniran kavez. Pretvarač priključimo preko odvojka transformatora na cca 25% punog napona, i on kreće asinhrono. Uzbudni namot priključen je na armaturu preko otpora, koji je 8—10 puta veći od vlastitog otpora. Struja, koju pretvarač uzima, iznosi na strani kliznih koluta samo 120 do 150%, na strani mreže cca 40 do 50% nominalne struje. Pretvarač će sam od sebe uskočiti u korak. Nakon toga kratko spojimo pokretački otpornik u uzbudnom krugu stroja, a uzbudni regulator postavimo u položaj praznog hoda, koji kod punog napona odgovara jalovoj struji mreže nula. Budući da je zasićenje još slabo, dobivamo uz sniženi napon

malu preuzbudu. Zatim preklopimo na puni napon. Kod većih pretvarača upotrebljavamo pri tome trofazni otpornik ispred kliznih koluta, koji struju preklapanja ograniči na 100% nominalne struje. Ovaj otpornik odmah zatim premostimo. Pretvarač radi na mreži uz cos $\varphi = 1{,}0$ neopterećen, te ga možemo opteretiti. Kako se za vrijeme asinhronog zaleta u svicima, koji su preko četkica kratko spojeni inducira napon, koji može prouzročiti jako iskrenje, nastojimo napon pokretanja sniziti, koliko je god moguće. Tu se služimo pokusima.

P o l a r i t e t. Bez posebnih mjera ne će se na četkicama pojaviti određeni polaritet. Kod malih pretvarača uključimo između istosmjerne mreže i stezaljki armature preklopku, koja nam omogućuje da udesimo ispravni polaritet mreže. Kod većih pretvarača ispala bi ova preklopka prevelika. Treba dakle udesiti ispravni polaritet samog pretvarača. To će nam uspjeti, ako je pošao sinhrono s krivim polaritetom, tako da ga pustimo da zaostane za jedan polni korak. Da bismo to postigli, promijenimo trenutačno polaritet uzbude, te ga zatim opet ispravno uključimo. Ovaj pokus smijemo međutim izvesti samo onda, ako pretvarač radi sa cca 25% napona, jer uz puni napon može lako doći do preskoka. Protuuzbudu treba odabrati dosta jaku, da bi svladala reakcionu silu polova, koja ga nastoji održati u koraku. Zbog toga nije u većini slučajeva dovoljno samo otvoriti uzbudni krug.

Ako pretvarač neprestano sam od sebe mijenja polaritet, pri čemu četkice svaki put jako iskre, onda je uzbudni krug pogrešno priključen ili je smjer vrtnje pogrešan (spoj za razmagnetiziranje). Dovoljno je zamijeniti priključke uzbude.

Malom nezavisnom uzbudom, koju uključimo već u početku pokretanja, možemo osigurati upadanje u sinhronizam s ispravnim polaritetom.

Ispitivanje. Nakon mjerenja otpora na hladnom stroju ispitujemo stroj kao istosmjerni motor u praznom hodu, rjeđe kao sinhroni motor. Pokus kratkog spoja izvodimo tek vrlo rijetko, jer nam obično nedostaje pogonski stroj. Pokus opterećenja vršimo na stroju zajedno sa svim pripadnim aparatima. Isto tako i pokus trajnog rada izvodimo zajedno s ovima. Pokusi udarnog kratkog spoja na istosmjernoj strani služe gdjekada za ispitivanje brzih automatskih sklopki. Oni nipošto ne spadaju u normalno ispitivanje.

M j e r e n j e o t p o r a. Otpor uzbudnog namota, namota pomoćnih polova i eventualno predviđenog kompaundnog namota odredimo, kako je to uobičajeno. Otpor namota armature mjerimo dva puta. Prvo, na isti način kao kod svakog normalnog istosmjernog stroja, kao otpor između (+) i (—) četkice, odnosno između dvije lamele, razmaknute za jedan

polni korak i drugo, kao otpor između dva koluta, razmaknuta za 180° el. Kod šesterofaznog pretvarača mjerimo čak sve tri vrijednosti između koluta U i X, V i Y, te W i Z. Ovi posljednji otpori smiju se tek za malo postotaka razlikovati od otpora na kolektorskoj strani. Kod trofaznog pretvarača određujemo na strani kliznih koluta otpor između U i V, V i W, te W i U. Otpor na istosmjernoj strani dobivamo iz ovih otpora množenjem sa 9/8. Općenito izraženo, otpor na istosmjernoj strani dobivamo kod pretvarača s parnim brojem faza neposredno kao najveću vrijednost, koju možemo izmjeriti između dva klizna koluta, dok kod pretvarača s neparnim brojem faza, treba ovu vrijednost još pomnožiti sa $m^2 : (m^2 - 1)$.

Ugrijanje namota armature određujemo iz prirasta otpora na strani kolektora i na strani kliznih koluta. Na taj način imamo dobru kontrolu.

Pokus praznog hoda. Kako, općenito, nemamo mogućnosti da stroj gonimo, izvodimo pokus praznog hoda motorskim postupkom. Pretvarač je priključen na istosmjernu mrežu, kojoj mijenjamo napon. Uzbudu udešavamo tako, da pretvarač uvijek ide sinhronom brzinom vrtnje. Iz snimljenog napona, struje i uzbudne struje možemo naći karakteristiku zasićenja $E_0 = f(i)$, te krivulju gubitaka $(N_ž + N_{tr}) = f(E_0)$.

Tjeramo li pretvarač u praznom hodu sa strane izmjenične mreže, možemo snimiti V-krivulju $I_j = f(i)$ kod nominalnog napona. Priključimo li pretvarač na sniženi napon, tako da radi na ravnom dijelu karakteristike, možemo odrediti strujni prijenosni omjer između struje na kliznim kolutima i uzbudne struje. Uzbudimo ga tako, da radi s cos $\varphi = 1$, te očitamo uzbudnu struju i'_0. Zatim ga potpuno razbudimo i očitamo struju, koju uzima iz mreže I'_0. Omjer I'_0/i'_0 je onaj isti I_k/i_k, koji bismo dobili iz pokusa kratkog spoja kao kod svakog sinhronog stroja. Na taj način dobivamo dakle karakteristiku kratkog spoja $I_k = f(i)$.

Pokus kratkog spoja. Kod praktičkog ispitivanja ne izvodimo pokus kratkog spoja. Karakteristiku kratkog spoja $I_k = f(i)$ možemo dobiti iz rezultata pokusa praznog hoda na izmjeničnoj mreži pri malom naponu, kako je gore izvedeno. I'_0 i i'_0 je par vrijednosti karakteristike kratkog spoja, koja prolazi kao pravac kroz ishodište.

Ispitivanje komutacije. Komutaciju ispitujemo kod jednoarmaturnog pretvarača prema istim gledištima kao kod istosmjernog stroja. Napose ispitujemo natkomutaciju ili potkomutaciju snimanjem krivulje napona četkice, te određujemo njezin stupanj odvajanjem ili dodavanjem struje u namotu pomoćnih polova. Posebna ispitivanja potrebna su kod pretvarača, koji treba da rade u oba smjera. Stroj, koji u jednom smjeru dobro komutira, radit će općenito u drugome besprijekorno samo do cca 25% nominalne struje. Ako je potrebna dobra komutacija do 100%,

onda treba kod povratnog rada na izmjeničnu mrežu uključiti dodatne zavoje u namot pomoćnih polova ili isključiti poredni otpornik uz namot pomoćnih polova, koji je predviđen kod rada na istosmjernu stranu. Uz istu djelatnu struju na strani kliznih koluta razlikuje se naime istosmjerna struja za dvostruki iznos struje potrebne za pokrivanje gubitaka. U praksi ćemo izbjeći svako prespajanje u strujnom krugu armature, ako na pomoćnim polovima predvidimo posebni namot za porednu uzbudu, koji je priključen na stezaljke armature. Ovaj slabi pomoćne polove kod rada izmjenična-istosmjerna struja, a jača ih kod rada istosmjerna-izmjenična struja. On dakle upravo kompenzira struju gubitaka; broj AZ iznosi mu zato tek oko 5% punog broja AZ pomoćnih polova. Ovaj namot ne treba ni u kojem slučaju prespajati.

Ako je kod natkomutacije potrebno da odvojimo struju I_p, treba raspor pomoćnih polova udesiti na vrijednost:

$$\delta_{novi} = \delta_{prije} \cdot \frac{I \cdot (w_{pom} - 0{,}14 \cdot w_a)}{(I - I_p)\, w_{pom} - I \cdot w_a \cdot 0{,}14} \approx \delta_{prije} \cdot \frac{1}{1 - 1{,}16 \cdot I_p/I}.$$

U slučaju potkomutacije, gdje smo trebali dodatnu struju I_d, dobivamo:

$$\delta_{novi} = \delta_{prije} \cdot \frac{I \cdot (w_{pom} - 0{,}14 \cdot w_a)}{(I + I_d) \cdot w_{pom} - I \cdot w_a \cdot 0{,}14} \approx \delta_{prije} \cdot \frac{1}{1 + 1{,}16 \cdot I_d/I}.$$

Ovdje znači w_{pom} broj zavoja jednog pomoćnog pola, w_a broj zavoja armature po polu, dakle $z : (2 \cdot 2a \cdot 2p)$, δ ukupni raspor pomoćnog pola, t. j. sumu raspora uz armaturu i uz jaram, te I struju armature. Približne formule desno vrijede za praktički važan slučaj omjera broja zavoja $w_{pom}/w_a = 1{,}0$, a faktor 0,14 uzima u obzir preostatak polja armature. Formule vrijede samo u slučaju, kad su ispitivanja izvršena kod rada izmjenična-istosmjerna struja. Uz stanovito približenje možemo reći, da promjeni struje u namotu pomoćnih polova od 1% odgovara promjena raspora za 1%.

S n i m a n j e o p t e r e ć e n j a. Opterećenje snimamo uz konstantan primarni napon transformatora. Pretvarač opteretimo na otpornike ili na istosmjernu mrežu, te udešavamo uzbudu tako, da faktor snage mreže ostane 1,0. Na taj način dobivamo karakteristiku regulacije $I_= = f(i)$. Kod pretvarača sa zakretnim transformatorom snimamo tri niza opterećenja, i to za najviši, srednji i najniži položaj regulatora. U slučaju da je predviđena regulacija prigušnicom, upotpunjujemo ove pokuse još pravim regulacijama napona, gdje uz konstantne vrijednosti istosmjerne struje mijenjamo uzbudnu struju, te određujemo zavisnost istosmjernog napona. Snimamo dakle karakteristiku $U_= = f(i)$. Rijetko određujemo krivulje mjesta pretvarača uz konstantne vrijednosti uzbudne struje.

Da bismo odredili *korisnost*, izvodimo još jedan pokus opterećenja, kod kojega držimo napon na kliznim kolutima konstantnim. Uzbudnu struju udešavamo tako, da faktor snage na kliznim kolutima ostane jednak jedinici. Mijenjamo istosmjernu struju. Istosmjerni napon gotovo se ne mijenja.

Za mjerenja na pretvaraču potreban je velik broj instrumenata, jer kod potpunog ispitivanja mjerimo napon, struju i snagu prema ovom pregledu:

Napon	Struja	Djelatna snaga	Jalova snaga
transformator, primarno	transformator, primarno	transformator, primarno (dva instrumenta)	—
transformator, sekundarno	transformator, sekundarno	—	—
prigušnica odn. zakretni transformator, sekundarno	zakretni transformator, primarno	—	—
klizni koluti	klizni koluti	klizni koluti (1 instrument)	klizni koluti (1 instrument)
istosmjerna mreža	istosmjerna mreža	—	—
uzbudni namot	uzbudni namot	—	—

Korisnost. Korisnost izračunavamo u praksi, zbog malih ukupnih gubitaka, isključivo metodom pojedinačnih gubitaka. U principu vrijedi ono, što je navedeno za istosmjerne strojeve. Gubitke u bakru armature izračunavamo s reduciranim otporom armature između dviju četkica kolektora (str. 254.). Gubitke u namotu pomoćnih polova i u serijskom uzbudnom namotu ne ćemo, naravno, reducirati. Gubitke u željezu uzimamo s krivulje užih gubitaka praznog hoda za EMS, koju smo izračunali iz istosmjernog napona i pada napona. Djelatni pad napona uzimamo dakle u obzir. Gubici trenja su konstantni. Gubici prijelaza nastaju, kako na kolektorskoj strani, tako i na strani kliznih koluta. Možemo ih izračunati kao: $I_{=} \cdot 2 + I_{kl} \cdot m \cdot 0{,}3 = 2{,}85 \cdot I_{=}$ uz $\cos\varphi = 1{,}0$, bez obzira na broj faza. Uzbudni gubici iznose $U_{uzb} \cdot i$. Korisnost, koja je općenito vrlo visoka, izračunavamo:

$$\eta\,\% = 100 - \frac{\text{ukupni gubici}}{\text{predana snaga} + \text{ukupni gubici}} \cdot 100.$$

Uobičajeno je, da korisnost pretvarača računamo samo za $\cos\varphi = 1{,}0$, ma da većina pretvarača radi sa strujom, koja nešto prethodi u fazi. Na taj

način možemo usporediti različite izvedbe, a da ne moramo poznavati svojstva ostalih aparata, preko kojih je pretvarač priključen.

F. JEDNOFAZNI I VIŠEFAZNI KOLEKTORSKI STROJEVI

a) Statorski pojeni trofazni poredni motor

Sastav i način rada. Statorski pojeni poredni motor u najjednostavnijoj izvedbi sastoji se od statora s normalnim trofaznim namotom, spojenim u zvijezdu ili u trokut, i od rotora za istosmjernu struju, koji je pojen preko tri ili preko šest četkica po paru polova. Stator je priključen na mrežu. Rotoru dovodimo napon frekvencije mreže, koji se može regulirati. Ovaj utječe na brzinu vrtnje, ako pada u smjer napona na četkicama, a na fazni položaj struje statora, ako zaostaje za 90⁰ (spoj vidi na sl. 152a, b). Komponentu napona, priključenog na rotor, koja služi za regulaciju brzine vrtnje zovemo regulacionim naponom U_r, a komponentu, koja služi za kompenzaciju faze kompenzacionim naponom U_k. Napon rotora, koji mjerimo kod spoja s tri četkice između dvije četkice razmaknute za 120⁰, a kod spoja sa šest četkica između četkica razmaknutih za 180⁰ pri otvorenom rotorskom krugu i dok rotor miruje, zove se napon mirovanja U_{20}. Kod vrtnje u smjeru okretnog polja napon se smanjuje, te kod bilo kojeg klizanja s iznosi $s \cdot U_{20}$. U tom ga slučaju zovemo naponom klizanja. Kolektor ispunjava važnu zadaću, da se frekvencija napona klizanja pokazuje uvijek onom istom, koju dovodimo namotu statora, koji miruje. To je razlog, što je — za razliku od regulacije brzine vrtnje i faze kod asinhronog stroja — frekvencija regulacionog napona U_r i kompenzacionog napona U_k jednaka frekvenciji mreže. Inače vrijede ista razmatranja, koja smo proveli na str. 146.

Brzinu vrtnje u praznom hodu n_0 dobivamo iz uvjeta, da napon klizanja mora biti jednak regulacionom naponu, koji dovodimo četkicama. Odavde izlazi brzina vrtnje:

$$n_0 = \frac{U_{20} - U_r}{U_{20}} \cdot n_{sin}, \text{ jer je } U_r = s_0 \cdot U_{20} \text{ uz } s_0 = \frac{n_{sin} - n_0}{n_{sin}}.$$

Kad regulacioni napon raste, smanjuje se brzina motora, koja može postati nula, ako je regulacioni napon jednak naponu mirovanja. Regulacioni napon nula daje sinhronu brzinu, a negativni regulacioni napon nadsinhronizam.

Kompenzacioni napon U_k sam po sebi ne utječe na promjenu brzine vrtnje, već tjera, u praznom hodu i kod opterećenja, dodatnu jalovu struju

kroz sekundarni krug. Veličina struje određena je uglavnom samo djelatnim otporom ovoga:

$$I_{komp\ sek} \approx U_k/R_{sek}\,.$$

Ova struja djeluje magnetizirajući na motor, te rasterećuje stator od jalove struje za iznos, koji odgovara prijenosnom omjeru (vidi str. 151). U stvari, neizbježivi rasipni otpori vanjskog sekundarnog kruga uzrokuju fazni pomak između kompenzacionog napona i struje kompenzacije, zbog čega dolazi do zamjetljivog povećanja brzine vrtnje kompenziranog stroja. Osim toga bit će i struja nešto manja od one prema gornjoj formuli, koju međutim ipak možemo uspješno primijeniti kod praktičkog ispitivanja. Ne treba nikada zaboraviti, da prijelazni otpor na četkicama predstavlja vrlo osjetljivi dio ukupnog sekundarnog otpora. Računamo ga po zamišljenoj fazi zvijezde kao $R_č$ = 1 V/ sekundarna nominalna struja.

Regulacioni napon možemo tehnički dobiti na različite načine. Važna je upotreba transformatora s odvojcima na sekundarnom namotu, dvostrukog zakretnog transformatora, i jednostrukog zakretnog transformatora u vezi s transformatorski proizvedenim fiksnim dodatnim ili pomoćnim naponom. U prvom i drugom slučaju zadržava regulacioni napon nepromijenjen fazni položaj od svoje pozitivne do svoje negativne maksimalne vrijednosti, dok u posljednjem slučaju zakreće fazu za ukupno 360°. Zbog toga izvodimo motor kod regulacionog transformatora i dvostrukog zakretnog transformatora sa čvrstim nosačem četkica, dok kod jednostrukog zakretnog transformatora treba nosač pomicati, kad povećavamo brzinu vrtnje. Kad bismo primijenili čvrsti nosač, prešlo bi djelovanje privedenog napona na rotoru od regulacije brzine vrtnje u čistu regulaciju faze.

Kompenzacioni napon uzimamo kod motora sa čvrstim nosačem najbolje preko posebnog kompenzacionog transformatora. Ovaj je primarno priključen na mrežu, dok je sekundarno spojen u krug armature motora u seriju s regulacionim naponom. Kako kompenzacioni napon iznosi cca 5 do 10% napona mirovanja armature, bit će snaga ovog transformatora cca 5 do 10% sinhrone snage motora. Uvijek ga snabdijevamo odvojcima, da bismo omogućili izbor različitih stepena kompenzacije.

Kompenzacioni napon dobivamo kod motora s pomičnim nosačem četkica — kako ćemo dalje izvesti kod motora s jednostrukim zakretnim transformatorom — pri malim i velikim brzinama zakretanjem nosača četkica prema narinutom regulacionom naponu, dok ga u području sinhrone brzine vrtnje daje sam regulacioni napon, koji nije potpuno nestao. Razlikujemo ovdje »kutnu kompenzaciju« i »sinhronu kompenzaciju«.

Udešavanje motora u prekretnom položaju. Prije pravog ispitivanja porednog motora treba mjerenjem napona izvršiti udešavanje u prekret-

nom položaju. Tim imenom označujemo onaj položaj nosača četkica i regulacione naprave, kod kojega motor u radnom spoju ide najmanjom brzinom vrtnje, te se potpuno jednako ponaša kod oba smjera vrtnje. Određujemo ga za nekompenzirano stanje. Kod toga vrijede slijedeća pravila, koja važe općenito:

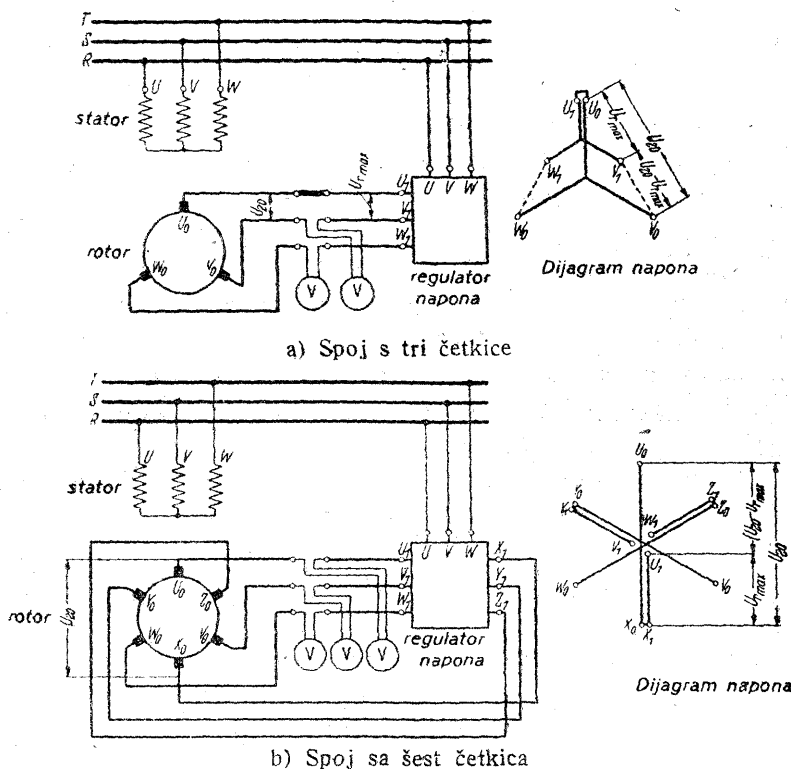
1. *Smjer okretnog polja u motoru* određujemo tako, da mu četkice kratko spojimo, te ga priključimo na napon. Smjer vrtnje polja podudara se sa smjerom vrtnje motora. Općenito priključujemo motor za desni smjer vrtnje, gledajući sa pogonske strane. Zatim označimo ili kontroliramo četkice na kolektoru. Oznake ovih, gledane u smjeru vrtnje kolektora, moraju biti: U_0, V_0, W_0 kod spoja s tri četkice, a U_0, Z_0, V_0, X_0, W_0, Y_0 kod spoja sa šest četkica.

2. Potražimo *položaj najvećeg napona na regulacionoj napravi.* Ako je moguće, odabiramo onaj položaj, kod kojega su jednako označeni primarni i sekundarni naponi međusobno u fazi. To je kod regulacionih transformatora u spoju zvijezda-zvijezda bez daljnjega moguće. Kod dvostrukog zakretnog transformatora možemo to postići, ako se jedan od oba sekundarna dijela može udešavati. Oba primarna dijela uzbudimo samo jednofazno, na pr. tako da prekinemo fazu *U,* te zakrenemo oba sekundarna dijela nezavisno jedan od drugoga, dok napon, koji se tamo inducira u fazi *U,* ne nestane. To vrijedi kod spoja u zvijezdu na primarnoj strani. Jednostruki zakretni transformator udesimo tako, da mu se sekundarni napon algebarski pribraja stalnom pomoćnom naponu.

3. Sada postavimo *nosač četkica* u pravi nul-položaj ili *prekretni položaj,* na taj način, što dovedemo razliku napona između četkica i regulacione naprave na minimum. Sl. 152a prikazuje spoj za slučaj s tri četkice, a sl. 152b za slučaj sa šest četkica. U prvom slučaju imamo dva, u drugom tri otvorena mjesta između rotora i regulacionog organa. Razliku napona očitavamo na voltmetru, kojim smo premostili otvoreno mjesto. Ako je U_{20} napon mirovanja rotora, a $U_{r_{max}}$ najveći regulacioni napon, iznosit će ova razlika $U_{min} = U_{20} - U_{r_{max}}$.

To se odmah vidi sa vremenskog dijagrama napona na sl. 152a i 152b. Ako se razlike napona međusobno ne slažu, spoj nije ispravan, ili su stezaljke pogrešno označene. U slučaju da smo na pr. kod spoja sa tri četkice udesili razliku u *V*-fazi na najmanju vrijednost $U_{20} - U_{r_{max}}$, pa ako je razlika napona u *W*-fazi veća od U_{20}, a nešto manja od zbroja $U_{20} + U_{max}$, onda treba primarno ili sekundarno zamijeniti fazu *V* sa fazom *W* regulacione naprave i potražiti pravi nul-položaj. To isto vrijedi i kod spoja sa šest četkica, kad razlika na pr. u fazi *U* pokazuje minimum, no obje su druge razlike napona veće od U_{20}.

4. Kao *kontrolu* prekretnog položaja, koji smo odredili, reguliramo sada, još uvijek pri otvorenom krugu armature, regulacionu napravu od dosadašnjeg položaja pozitivnog maksimalnog napona preko nul-položaja do položaja negativnog maksimalnog napona. Razlika napona mora neprestano rasti, te preko međuvrijednosti U_{20} doseći donačnu vrijednost $U_{20} + U_{r_{max}}$. Kod transformatora s odvojcima na sekundarnom namotu porast ide linearno s udešavanjem, kod dvostrukih i jednostrukih zakretnih transformatora po kosinusoidi.

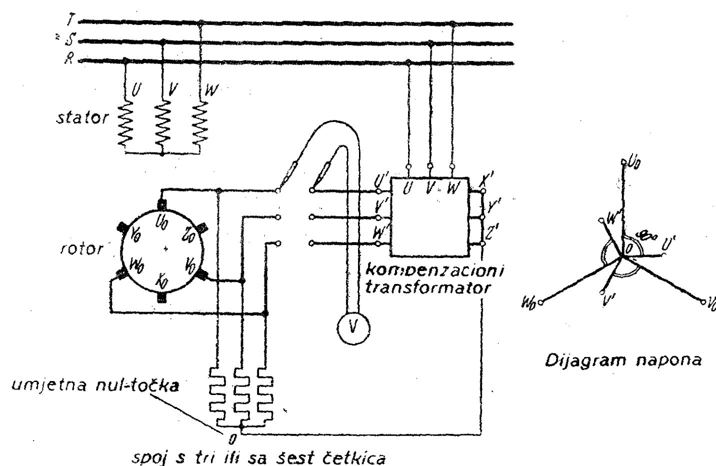


Sl. 152. Mjerenje napona regulacije u prekretnom položaju statorski pojenog porednog motora bez umjetne nultočke. Svagdje desno položaj napona kod čiste regulacije brzine vrtnje prema dolje. Radni spoj dobivamo premoštenjem otvorenih mjesta u krugu armature.

5. Sada se vratimo u prekretni položaj, odvojimo motor i regulator napona od mreže, uključimo krug armature, te priključimo smanjeni napon mreže. Motor pođe, te ga možemo, ako napon nije odviše jako reduciran, regulirati sve do maksimalne brzine vrtnje. Ako se radi o motoru za visoki napon, ne ćemo ga nikada isklopiti, prije nego što opet smanjimo brzinu vrtnje do najmanje vrijednosti, jer napon isklapanja na stezaljkama može, zbog normalne samouzbude, doseći 1,2-struku do 1,5-struku vrijednost nominalnog napona od nekoliko tisuća volta.

Vrlo dobru kontrolu točnog prekretnog položaja dobivamo promatranjem brzine vrtnje, struje armature i mrežne struje pri dosadašnjem smjeru vrtnje, i usporedbom s istim veličinama kod drugog smjera vrtnje. Ako je brzina vrtnje sada prevelika, pomičemo oprezno nosač četkica za vrijeme rada u smjeru vrtnje, dok ne dobijemo srednju vrijednost obiju očitanih brzina vrtnje. Zatim obrnemo smjer vrtnje još jedamput i ponovno uspoređujemo tri veličine. Eventualnim ponovnim justiranjem odredimo ispravni položaj nosača s točnošću jednog dijela širine lamele. Taj položaj označimo trajno, kao i kod istosmjernih strojeva, strelicom na kućištu i oznakom *P*.

Udešavanje napona kompenzacije kod upotrebe posebna kompenzacionog transformatora. Ako je predviđen poseban kompenzacioni transformator, određujemo ispravan vektorski položaj napona, koji on pridodaje u krugu armature s pomoću umjetne nul-točke. Vrijede isti podaci kao kod asinhronog motora na str. 149. Sl. 153 prikazuje spoj za izvedbu pokusa i dijagram napona, koji vrijedi kod ispravnog priključka. Mjerenje izvodimo, za razliku od asinhronog motora, pri mirovanju uz cca 30% normalnog napona.



Sl. 153 Mjerenje kompenzacionog napona s umjetnom nultočkom. Desno ispravan **položaj napona.**

Katkada ne možemo dovesti kompenzacioni napon u zahtijevani položaj od 90° prema naponu mirovanja armature, već možemo postići samo pomak od 60 do 120°. U tom slučaju 50% kompenzacionog napona smanjuje, odnosno povećava brzinu vrtnje, a samo 86,7% popravlja fazu.

Promjena smjera vrtnje. Promjenu smjera vrtnje postizavamo kod svih motora zamjenom dvaju dovoda mreže, koji poje zajedno motor i

regulator. Kod kompenziranog motora potrebno je osim toga unutarnje prespajanje. U principu vrijedi kod zamjene dvaju dovoda mreže, koji su zajednički za sve primarne namote (stator motora, regulator napona, kompenzacioni transformator), da fazni kutovi između sekundarnih napona gube svoj karakter faznog zaostajanja, te umjesto toga poprimaju karakter faznog prethođenja. Kako su regulacioni napon i napon armature u fazi, ne mijenja se kod njih ništa. No kutovi između kompenzacionog napona i napona mirovanja armature, koji iznose 90⁰, rjeđe 60⁰ ili 120⁰. preklope se za svoj dvostruki iznos i postanu —90, odnosno —60 i —120⁰. Kompenzacija bi dakle sada upravo pogrešno djelovala. Da bismo je opet ispravili, moramo primarno i sekundarno provesti odgovarajuća prespajanja. U prvom slučaju treba faze na jednoj strani kompenzacionog transformatora, dakle primarno ili sekundarno, priključiti obratno, u drugom slučaju primarnu stranu u jednom smjeru, a u trećem slučaju u drugom smjeru ciklički zamijeniti.

Ispravnost izvršena prespajanja treba odmah ispitati u praznom hodu. Vrijednost brzine vrtnje, mrežne struje i rotorske struje moraju biti točno jednake za oba smjera vrtnje.

Ako smo kompenzacioni napon kod podsinhrone brzine dodatno povećali zakretanjem četkica nasuprot smjeru vrtnje, kao što je to općenito pravilo, onda treba vratiti i četkice te ih zakrenuti nasuprot novom smjeru vrtnje.

Kako ispitujemo motor, opisat ćemo dalje pod b).

b) Motor s jednostrukim zakretnim transformatorom i pomičnim nosačem četkica

Spoj i princip regulacije. Sl. 154 prikazuje spoj ovog motora. Kao regulator brzine služi mu jednostruki zakretni transformator, koji pomičemo zajedno s nosačem četkica motora. Zakretni transformator je prigrađen na motor, a mehanički prijenos k između njega i nosača četkica je takav, da zakretu transformatora od 360⁰ el odgovara zakret četkica za gotovo 180⁰ el.

Regulacioni napon sastavljen je od pomoćnog napona U_{pom}, koji se ne mijenja ni po veličini, ni po fazi, i od napona zakretnog transformatora U_{tr}, koji je konstantan, ali ga možemo zakretati u fazi. U nul-položaju zakretnog transformatora zbrajaju se oba algebarski i daju maksimalni regulacioni napon $U_{r_{max}} = U_{pom} + U_{tr}$. U 180⁰ - položaju ukidaju se oba gotovo jednako velika napona, te preostaje samo njihova mala razlika, dok se u 360⁰ - položaju opet zbrajaju. Sa vektorske slike na sl. 154 vidimo, da nosač četkica treba istovremeno zakrenuti praktički za polovinu kuta zakretnog transformatora α, da bi napon, koji mu dovodimo, bio u

fazi s naponom na četkicama U_{20}. Iz daljnjih naponskih dijagrama na sl. 155 razabiramo, da kod $\alpha = 180^0$ narinuti napon stoji okomito na napon četkica i da kod $\alpha = 360^0$ leži s njime točno u protufazi.

Na tom se osniva nadsinhrona regulacija. Ne treba zaboraviti, da je zakretni transformator nakon zakreta od 360^0 došao električki, — a kod česte dvopolne izvedbe i mehanički — opet u svoj ishodni položaj, dok je međutim nosač četkica zakrenut za 180^0 iz prekretnog položaja.

Dijagram napona kod otvorenog kruga armature

∢ α = električki kut zakreta transformatora

∢ β = električki kut zakreta nosača

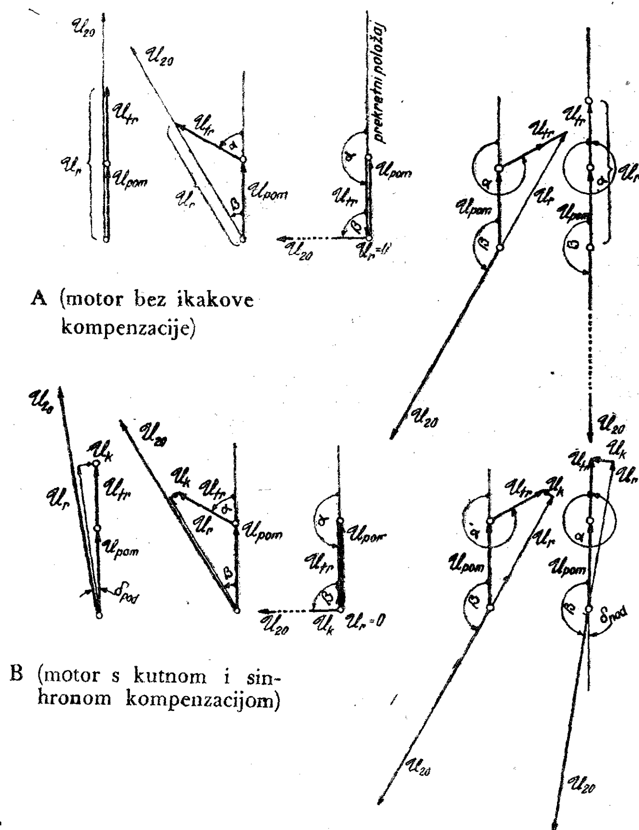
Sl. 154. Spoj i dijagram napona porednog motora s jednostrukim zakretnim transformatorom i pomičnim nosačem četkica uz odgovarajuće oznake stezaljki. Kod spoja s tri četkice otpadaju četkice $X_0 Y_0 Z_0$ Pomoćni namot spojen je tada u zvijezdu. U_r je komponenta za regulaciju brzine vrtnje, a U_k komponenta za regulaciju faze stvarnog napona $U_{pom} + U_{tr}$, koja leži u smjeru, odnosno zaostaje za 90^0 za smjerom napona mirovanja armature U_{20}.

Promjenu komponente ukupnog napona zakretnog transformatora i pomoćnog namota, koja služi isključivo za regulaciju brzine vrtnje, u zavisnosti o kutu zakreta zakretnog transformatora α možemo s vrlo dobrim približenjem prikazati jednostavnom relacijom:

$$U_r = (U_{pom} + U_{tr}) \cdot \cos\frac{\alpha}{2} \qquad \text{(vidi sl. 156a).}$$

Kao *kompenzacioni napon* ne možemo uzeti napon konstantna faznog položaja zbog zakretanja napona armature. Kod podsinhrone brzine djelovao bi on u protivnom slučaju ispravno, ali bi kod sinhrone brzine težio da poveća brzinu vrtnje, a kod nadsinhrone brzine dobili bismo čak protukompenzaciju. Zato proizvodimo kompenzacioni napon u položaju najmanje i u položaju najveće brzine vrtnje tako, da zakrenemo nosač četkica za mali kut kompenzacije δ i δ_{nad} prema regulacionom naponu.

Kao što možemo vidjeti sa sl. 155B, treba kod podsinhronizma nosač četkica zakretati nasuprot okretnom polju, dakle nasuprot smjeru vrtnje kolektora, a kod nadsinhronizma u suprotnom smislu. Uz ovakve prilike, svaki zahvat, koji smo poduzeli kod podsinhronizma djeluje dakle kod nadsinhronizma upravo u obrnutom smislu. Ukupni pomak nosača četkica kod ovako kompenziranih strojeva ne iznosi više 180° kod 360° zakreta transformatora, već 5 do 15° manje. Stoga moramo napraviti veći mehanički



A (motor bez ikakove kompenzacije)

B (motor s kutnom i sinhronom kompenzacijom)

Sl. 155. Dijagrami napona motora s jednostrukim zakretnim transformatorom kod otvorenog kruga armature

A za motore bez kompenzacije ($U_{pom} = U_{tr}$, $\beta = \frac{1}{2}\alpha$), B za motore sa „sinhronom kompenzacijom" ($U_{pom} > U_{tr}$) i sa "kutnom kompenzacijom" $\left(\beta = \delta_{pod} + \frac{\alpha}{2 \cdot (1 + p\,\%/100)}\right)$. Dijagrami vrijede: a) za najmanju, b) za podsinhronu, c) za sinhronu, d) za nadsinhronu i e) za najveću brzinu vrtnje. $\mathfrak{U}_r$ je komponenta napona ($\mathfrak{U}_{pom} + \mathfrak{U}_{tr}$) za regulaciju brzine vrtnje, $\mathfrak{U}_k$ za regulaciju faze, a $\mathfrak{U}_{2_0}$ napon mirovanja armature

prijenos od osovine zakretnog transformatora do nosača četkica. Označimo li njegovu pravu vrijednost sa k_m, a vrijednost reduciranu na dvopolni motor i dvopolni zakretni transformator sa k'_m, bit će:

$$k_m = 2 \cdot \frac{2p_{motora}}{2p_{transf.}}, \quad \text{odn.} \quad k_m' = 2$$

kod motora bez kutne kompenzacije, te

$$k_m = 2 \cdot \frac{2p_{motora}}{2p_{transf.}} \cdot \left(1 + \frac{p\,\%}{100}\right), \quad \text{odn.} \; k_m = 2 \cdot \left(1 + \frac{p\,\%}{100}\right)$$

kod motora s kutnom kompenzacijom.

Postotak p% određujemo prema posljednjoj formuli ili još jednostavnije kao procentualno odstupanje prijenosa od najbližeg cijelog broja. Kod prijenosa od na pr. 4,12 bit će $p\%$ jednako 3%, a kod prijenosa od 6,06 bit će samo 1%.

Općenito možemo pisati za električki *kut zakreta četkica* β, ako je nosač već u ishodnom položaju bio zakrenut za podsinhroni kut kompenzacije δ_{pod}:

$$\beta = \delta_{ansf.} + \frac{\alpha}{2\ (1 + p\,\%/100)}.$$

Početni podsinhroni kut kompenzacije δ_{pod} prelazi kod povećavanja brzine postepeno u nadsinhroni kut kompenzacije δ_{nad}, koji je većinom mali negativni kut, ili je jednak nuli. *Kut kompenzacije* δ ne predstavlja ništa drugo, nego zahtijevani kut odstupanja nosača, koji je zakrenut za faktični kut β, prema položaju zamišljenog nosača, koji bi bio zakrenut iz 0° - položaja točno za polovinu kuta zakretnog transformatora $\alpha/2$. Za njegove međuvrijednosti dobivamo prema tome:

$$\delta = \beta - \frac{\alpha}{2} = \delta_{pod} - \frac{\alpha \cdot p\,\%}{200 \cdot (1 + p\,\%/100)},$$

$$\approx \delta_{pod} - \frac{\alpha \cdot p\%}{200}.$$

»*Napon kutne kompenzacije*« zavisi neposredno o kutu kompenzacije δ (točnije o $\sin\delta$) i o regulacionom naponu U_r:

$$U_{k_k} = \frac{U_r}{57{,}3} \cdot \delta = \frac{U_{pom} + U_{tr}}{57{,}3} \cdot \cos\frac{\alpha}{2} \cdot \delta,$$

pri čemu je $\quad 57{,}3 = 360/2\pi$.

U sinhronom području zakretanje nosača četkica za male kutove nikako ne utječe na kompenzaciju stroja. Ovdje nosač stoji praktički okomito na mali preostali napon $U_{pom} - U_{tr}$, koji je određen algebarskom

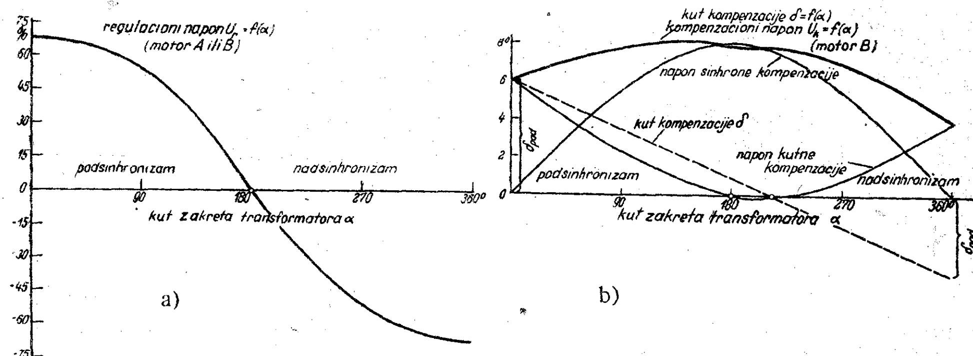
razlikom napona pomoćnog namota i zakretnog transformatora. Ovaj dakle predstavlja kompenzacioni napon u blizini sinhronizma. Zato ga također nazivamo »*sinhronim naponom kompenzacije*«. U položaju za najmanje i najveće brzine prestaje njegovo djelovanje. Sinhroni napon kompenzacije iznosi:

$$U_{k_{sin}} = (U_{pom} - U_{tr}) \cdot \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Kompenzacioni napon, koji djeluje kod pojedinih položaja zakretnog transformatora, sastoji se dakle od dva različita dijela, napona kutne i napona sinhrone kompenzacije. On iznosi:

$$U_k = U_{k_k} + U_{k_{sin}} = \frac{U_{pom} + U_{tr}}{57{,}3} \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \cdot \delta + (U_{pom} - U_{tr}) \cdot \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Na sl. 156 nanesene su krivulje regulacionog napona, napona kutne i sinhrone kompenzacije, te kuta kompenzacije u zavisnosti o kutu za-



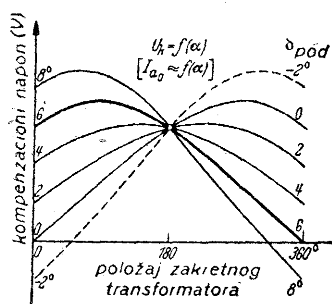
Sl. 156. Regulacioni napon U_r (a), te kompenzacioni U_k s komponentama: naponom sinhrone i naponom kutne kompenzacije, kao i kut kompenzacije δ u zavisnosti o kutu zakreta transformatora (b). Naponi su naneseni u % napona mirovanja armature. Kao osnova uzete su slijedeće vrijednosti: $U_{pom} = 38{,}2\%$, U_{tr} 28,8%, $p\% = 5{,}9\%$, $\delta_{pod} = 6^0$. Mjerilo za napon, koje nije uneseno (b) takvo je da 6^0 odgovara naponu od 7%.

kreta transformatora, za stroj kod kojega $p\%$ iznosi cca 5,9%. Na sl. 157 prikazan je samo ukupni kompenzacioni napon U_k stroja sa $p\%$ od cca 3,4%, i drugog stroja sa $p\%$ jednako nula, i to za podsinhrone kutove kompenzacije δ_{pod} različitih veličina, također i negativne. Kod ovog motora možemo općenito mijenjajući $p\%$ i $(U_{pom} - U_{tr})$ — ovo posljednje štednim transformatorom ispred zakretnog transformatora — slobodno odabrati tri točke krivulje kompenzacionog napona. Time se služimo kod novih strojeva.

Kako zbog rasterećenja zakretnog transformatora uzimamo napon pomoćnog namota U_{pom} uvijek veći od napona zakretnog transforma-

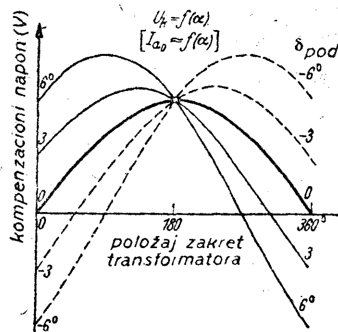
tora U_{tr}, smijemo motor regulirati na veću brzinu samo zakretanjem nosača četkica *nasuprot* smjeru vrtnje rotora. U protivnom bi slučaju sinhroni napon kompenzacije uzrokovao protukompenzaciju, te bi struja u praznom hodu i kod opterećenja bila zbog toga dvostruka do trostruka.

Udešavanje. *Prekretni položaj* zakretnog transformatora i nosača četkica naći ćemo na slijedeći način. Stator motora i primarnu stranu zakretnog transformatora uzbudimo smanjenim naponom od cca 30% nominalne vrijednosti. Zatim mjerimo fazne napone pomoćnog namota U_{pom}, sekundarne strane zakretnog transformatora U_{tr}, te napon mirovanja armature U_{20} između četkica U_0 i X_0, odnosno U_0 i V_0 kod rijetkog spoja sa tri četkice. Očitamo također i napon mreže. Zatim priključimo voltmetar na serijski spoj pomoćnog namota i zakretnog transformatora, te zakrećemo ovaj posljednji, dok napon ne dostigne maksimum, i to točno jednak sumi $U_{pom} + U_{tr}$. To je prekretni položaj zakretnog transformatora. Kontroliramo sumu napona u obje preostale faze, koja mora pokazivati jednaku vrijednost. Kako je maksimum dosta položit, bit će udešavanje točnije, ako transformator zakrenemo za isti kut, na pr. 60°, nalijevo i nadesno, te očitamo u oba slučaja smanjenu sumu napona. Ova će se općenito nešto razlikovati za oba smjera. Odredimo srednju vrijednost, zakrenemo regulator naprijed ili natrag toliko, da dobijemo taj napon,



a) Motor sa sinhronom i kutnom kompenzacijom

$$k_m = \frac{\Delta\alpha}{\Delta\beta} = 2 \cdot \frac{2\,p_{mot}}{2\,p_{transf}} \cdot \left(1 + \frac{p\,\%}{100}\right),\ p\,\% \approx 3{,}4\,\%.$$



b) Motor samo sa sinhronom kompenzacijom

$$k_m = \frac{\Delta\alpha}{\Delta\beta} = 2\ \frac{2\,p_{mot}}{2\,p_{transf}},\quad p\,\% = 0.$$

Sl 157. Kompenzacioni naponi kod različitih podsinhronih kutova kompenzacije δ_{pod} stroja za jedan smjer vrtnje (a), i stroja za oba smjera vrtnje (b). Jače izvučene krivulje vrijede kod ispravno udešenog stroja. (Struje armature u praznom hodu I_{a_0} pokazuju isti karakteristični tok).

oslobodimo kazaljku i ponovno je učvrstimo tako, da sada pokazuje kut zakreta, dakle na pr. 60°, te zakrenemo regulator natrag u nul-položaj. S obzirom na kabele za dovod do pomičnog primarnog dijela zakretnog transformatora (rotor), treba naravno potražiti onaj nul-položaj, kod kojega ovi kabeli vise ravno, da bismo kod regulacije brzine vrtnje pri lijevom i desnom smjeru vrtnje dopustili jednako veliki zakret.

Isti način udešavanja zakretnog transformatora vrijedi i kod strojeva za visoki napon, kod kojih primarni namot transformatora nije priključen neposredno na puni napon mreže od 3000 do 6000 V, već se poji preko posebnog namota od cca 500 V. Ovaj može biti smješten u statorskim utorima motora zajedno s pomoćnim namotom, ili pak na malom međutransformatoru.

Nakon toga određujemo *prekretni ili nul-položaj* nosača četkica. Unaprijed postavimo nosač u takav položaj, kod kojega tri, odnosno šest kabela za dovod do četkica vise ravno. Zatim mjerimo, u spoju koji je već bio naveden na str. 264, razliku napona između rotora s jedne strane, i zakretnog transformatora, koji mora ostati točno u svom nul-položaju, udesimo razliku napona na minimum, dakle na vrijednost $U_{20} - (U_{pom} + U_{tr})$. Svi otvoreni naponi moraju se, naravno, međusobno podudarati. Točnije ćemo prekretni položaj naći tako, da nosač ne diramo, a zakretni transformator sada zakrećemo za 60° nalijevo i nadesno. Iz obje očitane razlike napona, koje su porasle, odredimo srednju vrijednost, te nosač pomaknemo oprezno toliko, da tu srednju vrijednost mjerimo kao razliku. Zatim vratimo regulator natrag na nulu, označimo nosač četkica sa *P*, te oba mehanički spojimo. Ne treba zaboraviti još i slijedeću kontrolu, koja se sastoji u tome, da s regulatorom prijeđemo čitavo područje regulacije i neprestano očitavamo razliku napona na svim otvorenim mjestima. Ova mora neprekidno rasti po zakonu kosinusa sve do vrijednosti $U_{max} = U_{20} + U_{pom} + U_{tr}$, te ne smije možda pokazivati malo opadanje tik prije i tik iza položaja sinhronizma. Ovo posljednje će se dogoditi, ako okretno polje u zakretnom transformatoru rotira u pogrešnu smjeru. To naime kod određivanja prekretnih položaja za transformator i za nosač ne možemo bez daljnjega ustanoviti. Ako kod toga i zapamtimo, da treba dvije faze transformatora zamijeniti, ipak ne znamo, treba li zamjenu izvršiti primarno ili sekundarno. Djelovanje bi bilo u prekretnom položaju u oba slučaja prividno jednako. U stvari treba međutim transformator kod regulacije brzine vrtnje zakretati tako, da sekundarni napon zakrećemo nasuprot smjeru okretnog polja. Primarni dio treba dakle prostorno zakretati u smjeru okretnog polja. Ovo zakretanje čvrsto je međutim vezano s nosačem, koji treba zakretati nasuprot smjeru okretnog polja motora. To znači, da okretno polje transformatora mora rotirati na-

suprot polju motora. Jedno i drugo kontroliramo na slijedeći način. Motor kratko spojimo na četkicama, te ga potjeramo. Smjer vrtnje je isti kao i okretnog polja. Zatim kratko spojimo zakretni transformator sekundarno. On se nastoji zakrenuti. Ako se zakrene u istom smislu, priključen je ispravno, a ako pokušava krenuti nasuprot smjeru vrtnje motora, priključen je pogrešno. U tom slučaju treba zamijeniti dvije faze primarno, te ako smo već prije odredili nul-položaj transformatora, zamijeniti ćemo također i dvije faze sekundarno, i potražiti novi nul-položaj, koji smo dobili.

Sada stroj spojimo kako treba, priključimo ga na mali napon, te mu polako reguliramo brzinu vrtnje prema gore. Prolaz kroz sinhronizam treba izbjegavati ili ga treba provesti brzo, da bismo izbjegli samouzbudu istosmjernom strujom u krugu armature, do koje dolazi kod nekih strojeva kod premalog zasićenja. Visokonaponske strojeve uklapati ćemo i isklapati samo preko visokonaponske sklopke, jer zbog samouzbude frekvencijom mreže, do koje prirodno dolazi, može napon nakon isklapanja doseći punu ili čak povećanu vrijednost, što predstavlja opasnost za rukovaoca ručne sklopke. Pošto su se četkice dobro prilagodile u oba smjera vrtnje, kontroliramo još jedamput prekretni položaj nosača očitavajući brzinu vrtnje, mrežnu struju i struju armature u položaju najmanje brzine vrtnje za oba smjera. Ide li stroj u jednom smjeru prebrzo, zakrenemo nosač malo u smjeru vrtnje, ide li prepolagano, pomaknemo ga nasuprot smjeru vrtnje. Zakretni transformator ostaje naravno u svom nul-položaju.

Ako *mehanički prijenos* između osovine zakretnog transformatora i nosača četkica nije točno poznat, možemo ga neposredno izmjeriti. Blokiramo rotor, nosač četkica s uključenom spojkom postavimo tako, da se brid četkice točno poklapa s bridom lamele, te zatim transformator zakrenemo za toliki kut, da brid četkice, pošto je prešao veći broj lamela, opet točno pokrije brid jedne od njih. Očitamo kut zakreta transformatora i nađemo njegov omjer prema električkom kutu zakreta četkica, koji je određen brojem lamela. Pritom treba uzeti u obzir, da svim lamelama zajedno odgovara kut (broj polova motora) · 180°. Kut zakretnog transformatora podijeljen s kutom četkica daje vrijednost traženog prijenosa. Ovo mjerenje treba izvoditi vrlo pomno.

Mjerenja u praznom hodu. U pokuse praznog hoda spada određivanje naponskog prijenosnog omjera između glavnog namota statora i pomoćnog namota, te armature, i između rotora zakretnog transformatora i njegova statora. Ova mjerenja izvodimo još prije udešavanja motora. Upotpunjujemo ih još određivanjem napona među lamelama, koji nam omogućuje, ako je poznata vrsta namota, da odredimo tok armature. Ovaj iznosi:

$$\text{tok armature } \Phi' \text{ u } 10^{5} \text{ maksvela} = \frac{\text{napon među lamelama kod mirovanja preračunat na puni napon}}{2{,}22 \text{ broj zavoja armature između lamela}}$$

(kod 50 Hz).

Kod statorski pojenog trofaznog stroja zavisi napon među lamelama neposredno o klizanju. U sinhronizmu je jednak nuli. Kako kod svitka, koji komutira, četkica kratko spaja napon među lamelama, to ovaj u pogonu ne smije prekoračiti izvjesne vrijednosti, koje su uglavnom ograničene kvalitetom četkica. Općenito vrijedi iznos od 2,5 V kao maksimalna vrijednost. Stroj, kod kojega najmanja brzina vrtnje iznosi 50% sinhrone, ne smije dakle pri mirovanju uz puni napon mreže pokazivati među lamelama veći napon od 5 V.

Snimanje magnetiziranja kod motora bez zakretnog transformatora izvodimo bilo pri vrtnji s kratko spojenim četkicama, bilo pri mirovanju s podignutim četkicama. Ove ne smiju nikada biti spuštene kad stroj koji stoji treba priključiti na puni napon. Četkice bi se zažarile, a rotor bi se zbog velikih gubitaka u premoštenim zavojima zaletio. Gubici nas mnogo ne zanimaju, jer korisnost ne određujemo iz pojedinačnih gubitaka. Većinom određujemo samo struju magnetiziranja.

Magnetiziranje zakretnog transformatora ispitujemo pri punom naponu. Izmjereni gubici ostaju u pogonu trajno jednaki. Jalova snaga, koju uzima motor zajedno sa zakretnim transformatorom, najvažniji je rezultat iz oba pokusa, jer nam daje t. zv. točku magnetiziranja P_0 u kružnom dijagramu.

Najvažnije mjerenje u praznom hodu je snimanje struje armature u zavisnosti o položaju zakretnog transformatora. Budući da je struja armature, kao što je gore navedeno, gotovo neposredno zavisna o kompenzacionom naponu, to će njezin tok kvalitativno prikazivati tok ovog napona (vidi sl. 157). Ne treba međutim zaboraviti, da ampermetar uključen u krug armature ne će, naravno, pokazati, da li struja armature u praznom hodu fazno prethodi ili zaostaje. Instrument daje u oba slučaja otklon nadesno. Jalovoj struji superponira se osim toga već i u praznom hodu mala djelatna struja, koja je uzrok, osobito kod malih motora s relativno velikim gubicima, da mjesto, gdje jalova struja prolazi kroz nulu, možemo tek teško raspoznati. Po mrežnoj struji možemo odmah vidjeti, da li struja armature prethodi ili zaostaje u fazi. Ako je mrežna struja praznog hoda manja od zbroja struje magnetiziranja motora i zakretnog transformatora, onda imamo kompenzaciju u krugu armature. Sekundarna jalova struja prethodi u fazi. No ako je mrežna struja veća, imamo protukompenzaciju motora, i struja armature zaostaje. Struju armature u praznom hodu nanosimo prema gore, tamo gdje prethodi, a prema dolje,

tamo gdje zaostaje u fazi, u zavisnosti o kutu zakreta transformatora: Obje grane krivulje, koje u blizini minimuma struje čine skok, spojimo spojnicom, koja im se priljubljuje. Malu preostalu djelatnu struju ne uzimamo u obzir.

Postoje uopće dva tipa motora. U prve spadaju oni, koji su predviđeni za *reverzioni pogon*. Kod ovih ne smije biti podsinhrone kutne kompenzacije. Struja armature u praznom hodu mora zato početi od nule. Deblje izvučena krivulja na sl. 157b prikazuje pripadni tok struje. U drugu skupinu spadaju gotovo svi veći motori, koji treba da rade *samo u jednom smjeru*. Oni su kompenzirani u čitavom području regulacije. Jače izvučena krivulja na sl. 157a prikazuje tipični tok struje armature. Vidimo, da ova pokazuje u položaju najmanje brzine vrtnje gotovo istu vrijednost kao kod sinhronizma, a kod velikih brzina, gdje stroj kod punog opterećenja sam od sebe dolazi na $\cos \varphi$ jednako 1, i stoga ne treba kompenzacionog napona u krugu armature, smanjuje se gotovo do nule. Svratimo pažnju na maksimum struje praznog hoda tik pred sinhronim položajem zakretnog transformatora kod cca $\alpha = 120^0$, koji nastaje superpozicijom napona kutne i sinhrone kompenzacije. Ako je tamo struja prevelika, treba ili u podsinhronizmu ili u sinhronizmu kompenzaciju nešto reducirati.

Krivulje struje armature u praznom hodu dobro je snimiti i kod motora, koji su već u pogonu, ako postoji sumnja, da se međusobni položaj nosača i zakretnog transformatora promijenio. Zakretni transformator postavimo u prekretni položaj, odvojimo nosač četkica, te ga u praznom hodu oprezno udešavamo, dok ne dosegnemo struju armature ispravnog stroja u praznom hodu, koju možemo naći u ispitnom zapisniku. Smisao udešavanja je ispravan, ako struja armature kod pomicanja nosača nasuprot smjeru vrtnje poraste. Kod motora za reverzioni pogon udešavamo nosač naravno tako, da struja armature bude minimum. Ako nemamo rezultata ispitivanja, udešavamo kod većih motora za pogon u jednom smjeru vrtnje nosač tako, da struja u najnižem položaju zakretnog transformatora bude jednaka struji u sinhronom položaju, i da struja u najvišem položaju ne prolazi kroz nulu.

Kad je stroj konačno udešen, snimamo u praznom hodu mrežnu struju, struju u namotu zakretnog transformatora i u krugu armature, snagu iz mreže, te brzinu vrtnje u zavisnosti o položaju zakretnog transformatora.

Samouzbuda. Na kraju ispitujemo još samouzbudu stroja. Zakretni transformator postavimo u položaj, koji odgovara sinhronoj brzini vrtnje, te smanjimo napon, koji dovodimo stroju. Instrument sa zakretnim svitkom, priključen na poredni otpornik, koji je uključen u krug armature, pokazuje, da li teče istosmjerna struja. Čim dade otklon, nastupila je samo-

uzbuda. Istovremeno ćemo opaziti žestoko iskrenje na četkicama, smanjenu brzinu vrtnje i veću mrežnu struju. Odredimo u postocima kritični napon mreže, kod kojega nastupaju ove nepoželjne pojave. Ako taj napon leži ispod 90% nominalnog napona, onda nema opasnosti za motor, jer ovaj smije raditi samo unutar područja napona od 95 do 105%. Do samouzbude dolazi samo onda, kad je pomoćni namot smješten na statoru motora, te mu je namotni korak točno ili približno 100%. Istosmjerna samouzbudna struja, koja teče kroz armaturu i pomoćni namot, izlazi preko četkica, pri čemu uvijek U_0 — V_0 — W_0, te X_0 — Y_0 — Z_0 pokazuju međusobno isti polaritet, te proizvodi u statoru magnetsko polje, koje ima tri puta veći broj polova nego normalno polje motora. Stoga možemo samouzbudu sigurno izbjeći, ako namotni faktor pomoćnog namota za treći harmonički, skraćenjem koraka za 33,3%, učinimo jednakim nuli. Isto tako ne može doći do samouzbude, ako tri otvorene pomoćne faze spojimo u dvije odvojene zvijezde. Jedinò kad bismo zvjezdišta spojili, mogla bi opet nastupiti samouzbuda. Kod svih većih strojeva redovito primjenjujemo jedno od tih sredstava. Kod manjih strojeva relativno velik otpor u krugu armature sprečava samouzbudu. Zavisnost sposobnosti samouzbude o visini priključenog napona možemo protumačiti tako, što okretno polje, koje je stroju nametnuto, toliko već zasićuje putove u željezu, da je za istosmjerno polje, koje se superponira, potrebna velika uzbuda. Stoga možemo također, ako nastupi samouzbuda kod malih motora, ovu odmah ukloniti tako, da povećamo napon ili — suzivši širinu armature — zasićenje stroja. Ovu posljednju mjeru provodimo tako, da jedan dio zubâ na čeonim stranama rotora odtokarimo na cca 2 do 3 mm dužine zuba.

Zbog manjeg otpora hladan stroj naginje više samouzbudi od pogonski toplog stroja.

Poredni motor može naravno, kao svaki kompenzirani stroj, da se uz kompenzacioni napon odgovarajuće veličine sam uzbuduje trofaznom strujom normalne frekvencije. Ako je motor u praznom hodu upravo toliko kompenziran, da više ne uzima iz mreže jalovu struju, zadržat će i odvojen od mreže svoj napon. U slučaju pak da je bio natkompenziran, tako da je davao jalovu struju u mrežu, napon na stezaljkama će mu još porasti. Kako zasićenje obično ne uzimamo odviše visoko, možemo vidjeti kod isklopljenih strojeva u zaustavljanju povećanje napona do 50%. To možemo sigurno izbjeći, ako u krug armature uključimo otpornike, koje u radu premostimo. Ovu samouzbudu treba dakle smatrati sasvim normalnom pojavom.

Pokus opterećenja. Prije početka snimanja opterećenja zgodno je izračunati t. zv. minimalnu struju armature $I_{a\,min}$, koja odgovara nominal-

nom momentu motora. To je djelatna komponenta struje armature i ona se ne može smanjiti ispod te vrijednosti, bez obzira na stupanj kompenzacije. Izračunavamo je:

$$I_{a_{min}} = \frac{N_{sin}}{\sqrt{3} \cdot U_{20}} \cdot 1000 = \frac{M_n}{\sqrt{3} \cdot U_{20}} \cdot n_{sin} \cdot 1{,}03$$

kod spoja s tri četkice, te:

$$I_{a_{min}} = \frac{N_{sin}}{3 \cdot U_{20}} \cdot 1000 = \frac{M_n}{3 \cdot U_{20}} \cdot n_{sin} \cdot 1{,}03$$

kod spoja sa šest četkica.

Pri tome je N_{sin} snaga motora, reducirana na sinhronu brzinu vrtnje, M_n nominalni zakretni moment, a U_{2_0} napon mirovanja armature.

Ova je vrijednost osobito važna zato, što nam omogućuje da odredimo fazni položaj struje armature. Faktična struja armature I_a sastoji se od dvije međusobno okomite komponente, djelatne struje, koja je jednaka I_{amin}, te nepoznate jalove struje. Ovu posljednju možemo dakle izračunati:

$$I_{aj} = \sqrt{I_a^2 - I_{a_{min}}^2}.$$

Možemo odrediti i cos.φ struje armature s obzirom na napon armature, kao omjer $I_{amin} : I_a$.

Struja armature jedino kod nekompenziranog stroja raste uvijek, kad raste i zakretni moment. U slučaju kompenzacije uzima motor već u praznom hodu struju armature, koja je jednaka struji punog opterećenja, a u iznimnim slučajevima može biti i veća od ove. Kod mjerenja s rastućim momentom struja armature se prvo smanjuje, dosiže minimum, pa opet raste. Minimalna vrijednost je identična s minimalnom strujom za taj zakretni moment. Sa sl. 158 razabiramo, kako različite mogu biti krivulje struje. Općenito možemo reći, da je struja armature naprijed u fazi, prije no što dotakne pravac minimalne struje, a pošto se opet odvoji, poprima induktivni karakter.

Sl. 158. Struja armature u zavisnosti o zakretnom momentu. — = kapacitivna, . . . = induktivna struja Na mjestu, gdje dodiruje pravac minimalne struje, struja je čisto djelatna.

Ponašanje struje armature najbolje ćemo razabrati iz *kružnog dijagrama* motora sa zakretnim transformatorom. Na sl. 159 prikazane su kružnice za položaj najmanje, triju srednjih i najveće brzine vrtnje. S ovih

kružnica možemo očitati mrežne veličine na uobičajeni način. Struju armature I_a možemo također očitati, ali treba uzeti u obzir, da je mjerilo kod svakog položaja zakretnog transformatora drugo. I_a dobivamo kao dužinu od točke magnetiziranja P_0, koju dobivamo iz zbroja struje praznog hoda motora i zakretnog transformatora, do radne točke P na promatranoj kružnici. Mjerilo za struju armature određujemo približno:

$$\text{mjerilo za struju armature } a_2 = a_1 \cdot \frac{U}{U_{20} - U_{r_{linijski}}}$$

kod spoja s tri četkice,

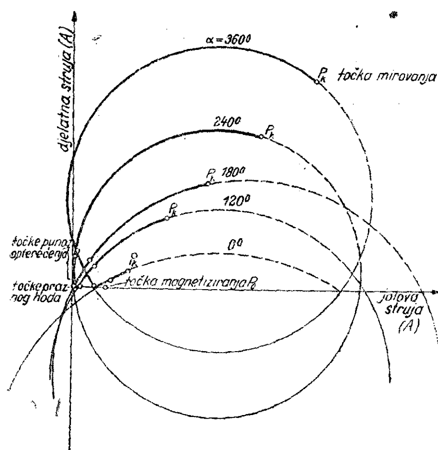
$$= a_1 \cdot \frac{U}{\sqrt{3} \cdot (U_{20} - U_r)}$$

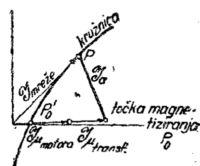
kod spoja sa šest četkica.

Pri tome je a_1 mjerilo za mrežnu struju u A/mm, U napon motora, U_{20} napon mirovanja armature, te U_r regulacioni napon, koji je jednak $(U_{tr} + U_{pom}) \cdot \cos \frac{\alpha}{2}$. Ako ove posljednje vrijednosti nisu poznate, možemo također vrlo približno uzeti:

$$a_2 = a_1 \cdot \frac{n_{sin}}{n_0} \cdot \frac{U}{U_{20}}, \quad \text{odn.} \quad = a_1 \cdot \frac{n_{sin}}{n_0} \cdot \frac{U}{\sqrt{3} \cdot U_{20}},$$

gdje n_0 predstavlja brzinu vrtnje u praznom hodu, za koju vrijedi dotična kružnica. Napose možemo na temelju ovih razmatranja ustanoviti jakost struje armature kod stroja u radu. Odredimo mrežnu struju po veličini i fazi, nacrtamo je i izmjerimo dužinu od krajnje točke vektora struje do točke magnetiziranja. Uz gornje mjerilo dobivamo veličinu struje armature.





Sl. 159. Mjerene krivulje mjesta (kružnice) mrežne struje za slučaj motora s jednostrukim zakretnim transformatorom. Odabrano je 5 različitih položaja zakretnog transformatora za najmanju, sinhronu, najveću i dvije srednje brzine vrtnje.

Kružnice statorski pojenog porednog motora leže za podsinhroni rad vrlo nisko, za sinhrono područje još uvijek znatno niže od odgovarajuće

kružnice asinhronog motora, a kod velikih brzina se dižu vrlo visoko. Po kružnicama na sl. 159 razabiramo, da motor kod malih i srednjih brzina treba posebnu kompenzaciju, dok iznad sinhrone brzine vrtnje sam od sebe postizava dobar faktor snage. Za nekompenzirani motor prolaze naravno sve kružnice točkom magnetiziranja.

Ponašanje novog tipa motora razabrat ćemo najbolje na osnovu kružnih dijagrama dobivenih iz rezultata ispitivanja. To vrijedi osobito u pogledu preopteretivosti i faktora snage, o čemu zavisi stupanj potrebne kompenzacije.

Kod udešavanja *kompenzacionog napona* držimo se u principu slijedećih pravila. U podsinhronizmu kompenziramo po mogućnosti tako jako, da struja armature kod punog opterećenja bude gotovo jednaka minimalnoj struji. To činimo s obzirom na zagrijavanje. Većinom je ovo udešavanje međutim ograničeno strujom armature u praznom hodu, koja iz istih razloga ne smije biti prevelika. Stoga kompenziramo općenito tako jako, da struja armature u praznom hodu bude jednaka onoj kod puna opterećenja, pri čemu je ova već induktivnog karaktera. Motore za pogon ventilatora, koji su u podsinhronizmu opterećeni tek malim zakretnim momentom, najbolje da uopće ne kompenziramo. Motore za teško pokretanje (kalanderi za papir, za gumu i t. d.) kompenziramo kod najmanje brzine vrtnje tako jako, da sigurno dadu traženi potezni moment. Obično ovi motori ne smiju onda više raditi duže vremena neopterećeni.

Kompenzacioni napon u sinhronom području, koji kod većih strojeva možemo u širokim granicama udešavati posebnim štednim transformatorom, preko kojega se poji primarni namot zakretnog transformatora, odabiramo tako, da bismo postigli dobar faktor snage uz struju armature, koja je kapacitivna i leži cca 20 do 30% iznad minimalne vrijednosti. Gdjekada treba s obzirom na preveliku struju armature neposredno prije sinhronizma nešto slabije kompenzirati.

Kod velike brzine vrtnje nastojimo dobiti što manju struju armature s obzirom na dobru komutaciju. Većinom dostaje sasvim mali ili čak iščezavajući kompenzacioni napon, da bismo postigli faktor snage u mreži 1,0 uz struju u armaturi, koja premašuje minimalnu struju samo za 10%. Kapacitivni faktor snage u mreži izbjegavamo u svakom slučaju, jer male prednosti treba odviše skupo platiti povećanim opterećenjem armature, kolektora i četkica.

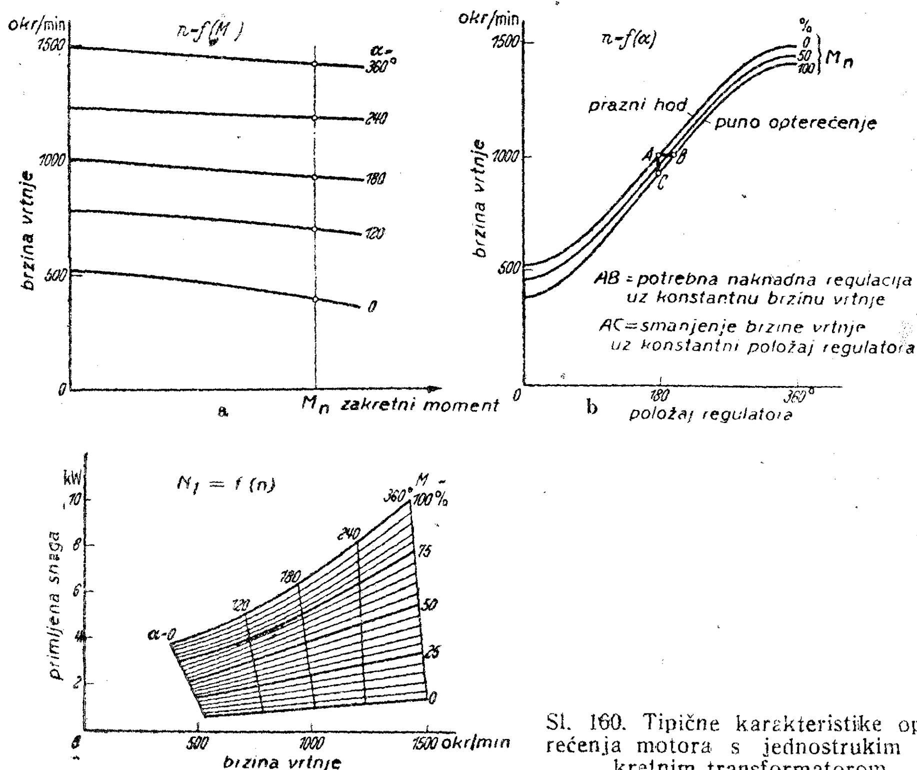
Opterećenje snimamo najbolje uz konstantne položaje zakretnog transformatora, i to za vrijednosti 0, 120, 180, 240 i 360°, dakle kod 100, 50, 0, —50 i —100% regulacionog napona. Zakretni moment mijenjamo od 0 do 125% svaki put po 25%. Ne treba zaboraviti, da dinamo-vagu, koju gotovo isključivo upotrebljavamo kao stroj za opterećenje, ne možemo

rasteretiti do zakretnog momenta nula, jer njene gubitke u praznom hodu mora, naravno, pokriti ispitivani stroj. Treba zato provesti vaganje i onda, kad smo joj otvorili uzbudni krug ili krug armature, da bismo udesili »prazni hod«.

Rezultate mjerenja možemo prikazati na najrazličitije načine. Kod preuzimanja, proračunavanja i naknadnih ispitivanja na licu mjesta, pokazali su se dobrima ovi načini prikazivanja:

1. Karakteristike brzine vrtnje $n = f(M)$ kod različitih položaja zakretnog transformatora.

2. Karakteristike brzine vrtnje $n = f(\alpha)$ kod različitih vrijednosti zakretnog momenta.



Sl. 160. Tipične karakteristike opterećenja motora s jednostrukim zakretnim transformatorom

3. Korisnost i faktor snage $= f(n)$ kod različitih vrijednosti zakretnog momenta.

4. Snaga, koju stroj uzima iz mreže $N_1 = f(n)$ kod različitih vrijednosti momenta.

5. Struja armature $I_a = f(M)$ kod različitih položaja zakretnog transformatora.

6. Struja u mreži, u armaturi i u zakretnom transformatoru, te faktor snage, korisnost i brzina vrtnje = $f(\alpha)$ kod punog zakretnog momenta.

Ovakve su krivulje prikazane djelomično na sl. 160. Spojimo li međusobno točke, kojima odgovara isti položaj zakretnog transformatora na krivulji pod 4., prema sl. 160c, možemo dobiti smanjenje brzine vrtnje, dakle karakteristiku brzine vrtnje, i korisnost kao omjer predane i primljene snage. Kod stroja u pogonu potrebno je mjeriti samo snagu, koju uzima i brzinu vrtnje, da bismo mogli ustanoviti, u kojem je stupnju opterećen, dakle prije svega, nije li možda preopterećen.

Korisnost. Korisnost statorski pojenog stroja određujemo u praksi u ispitnim stanicama isključivo dinamo-vagom. Kod točnog izračunavanja treba uzeti u obzir korekciju dinamo-vage. Korisnost izračunavamo:

$$\eta\,\% = \frac{M \quad n}{N_1 \quad 9{,}73} \quad u\ \%,$$

pri čemu je M = zakretni moment u mkg (uključivši korekciju),
n = brzina vrtnje u okr/min,
N_1 = primljena snaga u kW.

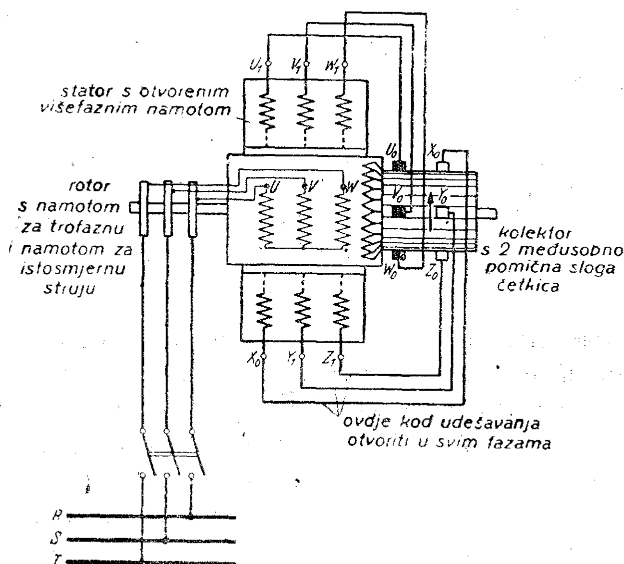
Promjena smjera vrtnje. Smjer vrtnje mijenjamo tako, da zamijenimo dva priključka na mrežu. Kod regulacije na veću brzinu treba zakrenuti nosač četkica nasuprot novom smjeru vrtnje. Kod motora bez podsinhrone kompenzacije nije ništa više potrebno. Naprotiv, kod strojeva s podsinhronom kompenzacijom treba nosač odvojiti od zakretnog transformatora, zakrenuti ga za dvostruki kut kompenzacije nasuprot novom smjeru vrtnje i opet spojiti. Praktičnije je, naravno, da nosač zakrećemo regulacionom napravom, dakle dok je još spojen sa zakretnim transformatorom, da ga zatim odvojimo, te sada vratimo sam transformator u početni položaj, i napokon ponovno uspostavimo međusobnu mehaničku vezu. Ovu predstavlja većinom uže, rjeđe odabiramo lanac kao prijenosni element.

c) Rotorski pojeni trofazni poredni motor (Schrageov motor)

Sastav i način rada. Rotorski pojeni poredni motor ima rotor s dva odijeljena namota, i stator samo s jednim namotom. Jedan od rotorskih namota izveden je trofazno, te je kao primarni namot pojen preko tri klizna koluta iz mreže. Drugi namot je normalni rotorski namot za istosmjernu struju, koji je smješten u iste utore i priključen na kolektor. Na ovome kližu dva međusobno pomična sloga četkica. Četkice su spojene s počecima i svršecima višefaznog otvorenog namota statora (sl. 161). Okretno polje proizvedeno namotom, koji je priključen na mrežu, rotira relativno prema željezu rotora sinhronom brzinom, dok mu je relativna brzina prema sta-

toru i prema prostoru manja, koliko odgovara klizanju. Kod sinhronizma okretno polje, promatrano sa statora, miruje, a kod nadsinhronizma promijenilo je svoj smjer vrtnje.

Napon armature, koji možemo izmjeriti na kolektoru u razmaku polnog koraka, pokazuje konstantnu vrijednost, koja ne zavisi o mehaničkoj brzini vrtnje rotora. Ovaj možemo promatrati kao transformator, koji rotira, dok mu primarni i sekundarni namot relativno jedan prema drugome miruju. Obim među sobom pomičnim slogovima četkica možemo s kolektora uzeti bilo koji dio napona prema želji. Veličina mu se odnosi prema punom naponu, kao tetiva što leži između četkica prema promjeru,

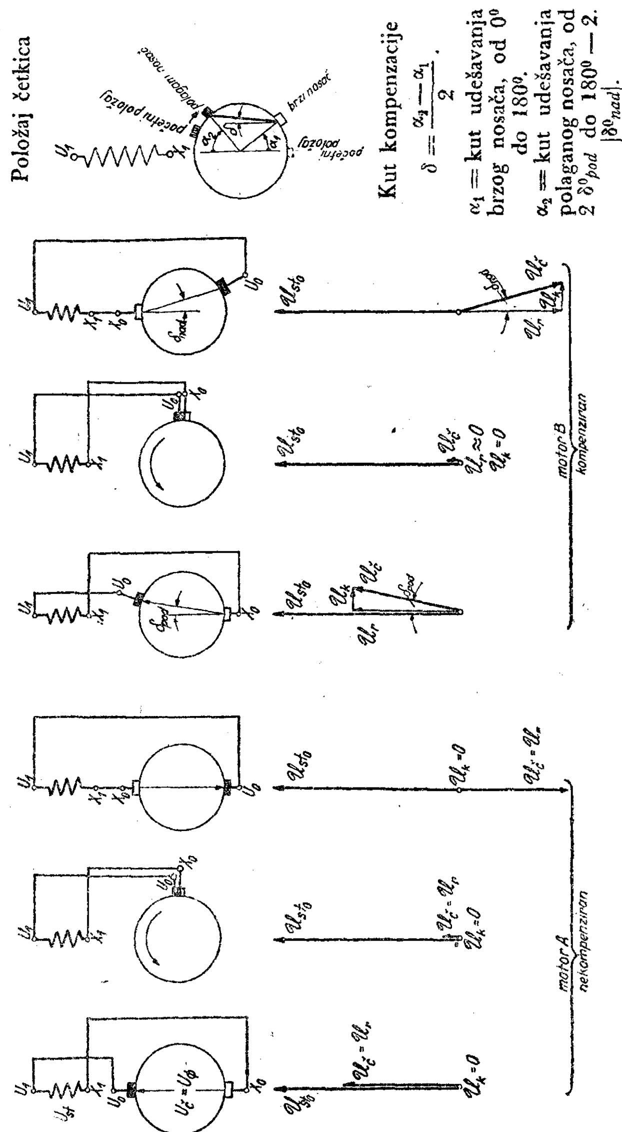


Sl. 161. Spoj Schrageovog motora

ako položaj četkica prikažemo u dvopolnoj slici (sl. 162). Ako obje međusobno pripadne četkice stoje jedna do druge na kolektoru, onda uzimamo napon nula. Ako prijeđemo s jednom mimo druge, napon će okrenuti fazni položaj za 180° te će opet rasti, dok ne dosegne dijametralni napon kao negativnu maksimalnu vrijednost. Zajedničkim zakretanjem slogova četkica u istom smjeru ne mijenja se veličina napona među njima, ali se zato mijenja fazni položaj. Napon i fazu možemo dakle slobodno odabirati. Jedino frekvencija napona na četkicama zavisi o brzini vrtnje motora, i to, za razliku od statorski pojenih tipova, jednaka je frekvenciji klizanja.

Napon, koji se inducira u statorskom namotu i njegova frekvencija zavise o brzini vrtnje. Najveći su kod mirovanja, iščezavaju kod sinhronizma, i opet rastu kod nadsinhronih brzina vrtnje. Statorski namot ponaša se dakle točno kao sekundarni namot normalnog asinhronog motora. Re-

gulacioni i kompenzacioni napon odgovarajuće veličine i faze dobiva preko četkica (sl. 162A, B). Oduzimaju li četkice napon, koji je u fazi, regulira ovaj samo brzinu vrtnje, a oduzimaju li napon, koji zaostaje za 90°, on regulira fazu. Općenito leži tetiva kroz dvije pripadne četkice u istoj osi

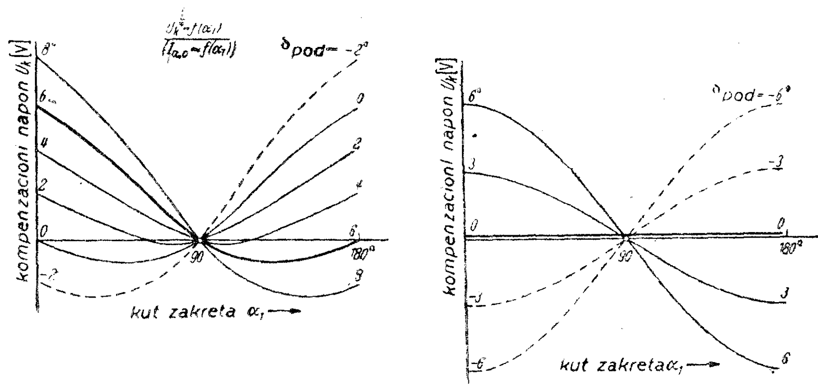


Sl. 162. Položaji četkica i dijagrami napona za nekompenzirane i kompenzirane strojeve. Vrijedi a) za najmanju, b) za sinhronu, c) za nadsinhronu brzinu vrtnje. Desno opći položaj. $\mathfrak{U}_\Phi$ je dijametralni napon armature, $\mathfrak{U}_r$ komponenta za regulaciju brzine vrtnje, $\mathfrak{U}_k$ komponenta za regulaciju faze napona četkica $\mathfrak{U}_č$. $\mathfrak{U}_{st_0}$ je napon statorskog namota kod mirovanja i otvorenog sekundarnog kruga, za koji slučaj vrijede i dijagrami.

s pripadnom fazom statora, a samo kod većih motora udešavamo malim zakretom osi četkica kompenzaciju stroja. Os četkica treba zakrenuti u podsinhronizmu za kut δ_{pod} u smjeru vrtnje, da bismo dobili ispravnu kompenzaciju. Imamo dakle točno jednake prilike kao kod statorski pojenog motora. U sinhronizmu nije moguća nikakva kompenzacija bez vrlo kom-

pliciranih mehaničkih naprava. Schrageov motor poprima tamo dakle isti karakter kao normalni kratko spojeni asinhroni motor.

Kod nekompenziranog stroja zakrećemo kod pune regulacije oba nosača svaki za 180°. Kod kompenziranog stroja zakrećemo jedan nosač za kut manji od 180°, dok drugi zakrećemo za punih 180°. Ovaj posljednji moramo dakle zakretati brže. To možemo lako postići različitim zupčanim prijenosima od zajedničke regulacione osovine do oba nosača ili drugim prikladnim konstruktivnim mjerama. Kod zakretanja vrijedi pravilo, da u slučaju regulacije prema gore brži nosač treba zakretati u smjeru vrtnje kolektora. U cilju podsinhrone kompenzacije treba bilo koji nosač zakrenuti iz prekretnog položaja za kut $2 \cdot \delta_{pod}$ nasuprot smjeru vrtnje armature. Obično nosi jedan nosač četkica oznaku *P*, a drugi dvije oznake *D* i *L*, od kojih jedna vrijedi za desni, a druga za lijevi smjer vrtnje. Ovalna rupa u nosaču omogućuje nam, da ga premjestimo iz jednog u drugi položaj, pošto smo popustili vijke za pričvršćenje. Ako treba regulacionu osovinu, kao što je to često poželjno, za oba smjera vrtnje motora zakretati u istom smjeru, moramo se odgovarajućim mjerama, na pr. preklapanjem zupčanika, pobrinuti, da se i opet brži nosač giba u novom smjeru vrtnje kolektora.



Sl. 163 Krivulje kompenzacionog napona U_k Schrageovog motora kod različitih podsinhronih kutova kompenzacije δ_{pod}. Jače izvučene krivulje vrijede kod ispravnog udešavanja. (Sekundarne struje praznog hoda I_{a_0} pokazuju istu tipičnu sliku.)

a) Kompenzirani motor. Prijenos između nosača $k_n > 1{,}0$.

b) Nekompenzirani motor. Prijenos između nosača $k_n = 1{,}0$.

Regulacioni napon Schrageovog motora ravna se približno po zakonu:

$$U_r = U_{\Phi} \cos \alpha_1 .$$

Pritom znači U_{Φ} dijametralni napon armature, a α_1 kut zakreta brzog nosača iz 0°-položaja. Kut drugog nosača, s početnim položajem $2\delta_{pod}$ koji

odgovara djelotvornom zakretu osi četkica δ_{pod}, neka je α_2 (sl. 162). Vrijedi:

$$\alpha_1 = 2\delta_{pod} + \alpha_1/k_n ,$$

gdje je k_n prijenos od brzog na polagani nosač, dakle jednako 1,0 kod nekompenziranih, a jednako 1,0 + p%/100 kod kompenziranih motora.

Podsinhroni kut kompenzacije δ_{pod} između osi četkica i osi statorskog namota prelazi za vrijeme podizanja brzine vrtnje postepeno u nadsinhroni kut kompenzacije δ_{nad}, koji većinom udesimo tako, da bude jednak nuli. Rjeđe odabiramo malu negativnu vrijednost. *Kut kompenzacije* iznosi:

$$\delta = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} = \delta_{pod} - \frac{\alpha_1}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{k_n}\right),$$

$$\approx \delta_{pod} - \frac{\alpha_1}{200} \cdot p\,\%.$$

Kompenzacioni napon neposredno zavisi o kutu kompenzacije δ (točnije o sin δ) i o regulacionom naponu U_r prema jednadžbi:

$$U_k = \frac{U_r}{57{,}3} \cdot \delta = \frac{U\phi \ \cos\alpha_1}{57{,}3} \cdot \delta \qquad \text{uz } 57{,}3 = 360/2\pi.$$

Sl. 163. prikazuje, kako se mijenja kompenzacioni napon kompenziranog i nekompenziranog stroja kod različitih podsinhronih kutova kompenzacije δ_{pod}. Karakteristike struje armature u praznom hodu I_{ao} na kolektorskoj strani izgledaju uglavnom isto tako, pa iz njih možemo, kao kod statorski pojenog motora, unatrag odrediti kompenzacioni napon stroja, odnosno položaj nosača.

Udešavanje Schrageovog motora. Kod Schrageovog motora, koji je izveden s trofaznim statorom, prekinemo sve tri sekundarne faze, te priključimo rotor preko dva klizna koluta na mrežu smanjenog napona. Zatim rotor zakrećemo tako dugo, dok napon u statorskoj fazi U_1X_1 ne dosegne maksimum. Ovaj možemo isto tako raspoznati po jednakosti napona u obje preostale faze V_1Y_1 i W_1Z_1, koji su jednaki polovini maksimalne vrijednosti. U tom položaju rotor zaklinimo.

Zatim udešavamo nosač četkica *I*, s četkicama označenima $U_0V_0W_0$, tako da ga zakrećemo, dok napon između četkica V_0 i W_0 ne iščezne, a napon između U_0V_0 ne bude jednak onome između U_0W_0. Od više mogućih položaja odaberemo onaj, koji je najpovoljniji za smještaj dovodnih kabela, te ga označimo sa *P*.

Nakon toga udešavamo nosač *II*, kod kojega mora biti napon između Y_0 i Z_0 jednak nuli, dok između X_0Y_0 i X_0Z_0 moramo očitati iste vrijednosti. I opet uzimamo u obzir smještaj dovoda i odabiramo osim toga samo onaj položaj, kod kojega četkice jednog nosača leže točno između četkica

drugog usporedno smještenog nosača. X_0 mora ležati između V_0 i W_0, Y_0 između W_0 i U_0, a Z_0 između U_0 i V_0. Ovaj položaj označimo također sa P. Sada spojimo oba nosača četkica međusobno, i zupčanikom ili užetom s regulacionom osovinom. Rotor otklinimo i uzbudimo ga trofazno smanjenim naponom. Napon između četkica U_0X_0, V_0Y_0 i W_0Z_0 jednak je maksimalnoj vrijednosti U_{Φ}. To ćemo konstatirati malim zakretom regulacione osovine u jednom i u drugom smjeru, pri čemu se napon između četkica svaki put mora smanjiti. Naponi faza statora U_{st_0} sada su jednako veliki i dosižu obično cca dvostruku vrijednost napona mirovanja rotora. Sada mjerimo, kao i kod statorski pojenog motora, razliku napona na tri mjesta, gdje je sekundarni krug otvoren. Kod ispravnog položaja obaju nosača mora ona biti jednaka $U_{st_0} - U_{\Phi}$. Ako je, naprotiv, jednaka sumi obiju ovih vrijednosti, treba zamijeniti početke i krajeve bilo na statorskom namotu, bilo na dovodima do četkica. Zatim zakrećemo oba nosača okretanjem ručnog kola. Razlika napona mora rasti i konačno doseći vrijednost $U_{st_0} + U_{\Phi}$. Vratimo se u početni položaj, spojimo sekundarni krug, priključimo motor ponovno na smanjeni ili na puni napon i reguliramo kroz čitavo područje. Brzina vrtnje, polazeći od najmanje vrijednosti, raste do najvećeg iznosa. Pokusima, koji su opisani kod statorski pojenih motora, kontroliramo još jedamput prekretni položaj nosača.

Kod manjih i srednjih nekompenziranih motora, ali i kod ostalih strojeva, rado primjenjujemo *pojednostavljenu metodu udešavanja* s trofaznom uzbudom. Sekundarni krug i opet prekinemo na tri mjesta i zakrećemo oba međusobno spojena nosača četkica tako dugo, dok razlika napona na mjestu prekida ne bude minimalna. Istovremeno mjerimo između četkica U_0X_0, V_0Y_0 i W_0Z_0 najveću vrijednost napona mirovanja armature U_{Φ}. Najmanja vrijednost ne mora bezuvjetno biti jednaka razlici napona statora i rotora, jer nosači doduše stoje jedan nasuprot drugome, no nipošto ne stoje točno u prekretnom položaju. Tada spojimo sekundarni krug i potjeramo motor. Mjerimo brzinu vrtnje, mrežnu struju i struju armature za jedan i za drugi smjer vrtnje. Općenito ćemo dobiti različite vrijednosti. Sada oslobodimo jedan od oba nosača, najbolje onaj, koji je pristupačniji i zakrećemo ga oprezno za vrijeme rada tako dugo, dok brzinu vrtnje i struje ne udesimo na srednju vrijednost prijašnjih očitanja. Nosač ponovno pričvrstimo, promijenimo smjer vrtnje, te gdjekada još dotjeramo udešavanje. Zatim opet zakrećemo oba nosača zajedno, dok ne nađemo najmanju vrijednost brzine vrtnje. Sada oba nosača stoje u prekretnom položaju, te ih možemo označiti. Kod motora s različitim brzinama pomicanja nosača nastaje mala pogreška, koja nema značenja, ako nosači nisu otprije bili odviše daleko pomaknuti iz P-položaja. Ovaj je postu-

pak najbrži, te ga možemo također primijeniti za kontrolu kod već udešenih strojeva.

Veće motore izvodimo često sa sekundarnim brojem faza većim od tri. U tom slučaju primjenjujemo za udešavanje, najbolje, trofaznu rotorsku uzbudu, te upotrebljavamo za udešavanje dva zvjezdišna otpornika. Udešavamo prvo jedan, pa onda drugi nosač. Razlika napona između stezaljki statora i jednako označenih četkica mora biti jednaka, kod ispravna položaja, polovini razlike U_{st_0} i U_{Φ}. Inače postupamo kao kod normalnog stroja.

Pokusi praznog hoda, kratkog spoja i opterećenja. Za provedbu ovih pokusa vrijede ista gledišta kao kod statorski pojenog porednog motora. Treba međutim uzeti u obzir, da struja u sekundarnom krugu ima frekvenciju klizanja, pa je stoga ne možemo mjeriti preko strujnog transformatora, već samo direktno. Kod prolaza kroz sinhronizam opažamo gdjekada ponešto nestalno ponašanje stroja, koje se kod brzine vrtnje, a osobito kod struje armature očituje kao skok. Uz točno sinhronu brzinu, tok motora miruje u prostoru kao i relativno prema statoru. On se u tom slučaju zakvači za magnetske uglove, koje nikada ne možemo izbjeći, a koji nastaju zbog nesimetrija, tako da dolazi do neke vrste reaktivnog djelovanja motora, kako ga poznajemo kod sinhronih strojeva s istaknutim polovima. I otpori sekundarnih faza, koji nisu posve jednaki, uzrokuju također da se tok u sinhronizmu zakvači, što možemo još i pojačati, ako otvorimo jednu ili više faza sekundarno. Motor tada naime radi kao jednoarmaturni pretvarač, koji doduše na istosmjernoj strani daje samo svoju uzbudnu snagu, ali inače razvija zakretni moment kao čisti sinhroni motor. Ovo zapinjanje u sinhronizmu može se neugodno ispoljiti jedino gdjekada kod motorâ sa zajedničkom regulacijom brzine vrtnje.

Udešavanje kompenzacije vršimo općenito tako, da kompenziramo samo u podsinhronizmu zakretanjem jednog nosača. Svejedno je, koji od oba nosača zakrećemo, no u svakom slučaju zakrećemo nasuprot smjeru vrtnje. Krivulja brzine vrtnje nešto će se pomaknuti s obzirom na položaj ručnog kola, ali inače nema nikakove razlike kod zakretanja jednog ili drugog nosača. Kompenziramo tako jako, da struja armature u praznom hodu bude jednaka struji kod punog opterećenja. Minimalnu struju armature na kolektorskoj strani određujemo slično kao kod statorski pojenog motora:

$$I_{a_{min}} = N_{sin} \cdot \frac{1000}{m_{sek} \cdot U_{st_0}} = \frac{M_n}{m_{sek} \cdot U_{st_0}} \cdot n_{sin} \cdot 1{,}03,$$

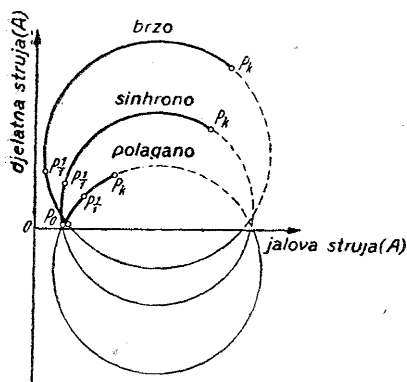
gdje je m_{sek} broj faza statorskog namota. Kako rotorski pojeni motor u sinhronizmu ne možemo kompenzirati, teći će tamo u armaturi, ako struja

kratkog spoja nije odviše mala, otprilike minimalna struja armature. Zbog gubitaka nailazimo na cca 5% veće vrijednosti. U nadsinhronizmu kompenzira se stroj kod punog opterećenja sam. Odustajemo dakle od promjene kuta. Podsinhroni kut kompenzacije općenito ne možemo očitati u stupnjevima, ali ga možemo lako odrediti po ovoj formuli:

$$\delta_{pod} = \frac{d}{\pi \cdot D_{nosača}} \cdot 2p \cdot 90^0,$$

u kojoj znači d pomak jednog nosača iz P-položaja u mm, $D_{nosača}$ promjer nosača u mm, $2p$ broj polova motora. δ_{pod} je kut zakreta osi četkica prema osi statora. Sam kut zakreta nosača dva puta je veći.

Opterećenje očitavamo kod različitih konstantnih položaja četkica, a očitanja nanosimo na isti način kao kod statorski pojenog motora. Korisnost određujemo najbolje direktno dinamo-vagom. Nanesemo li kružnice mrežne struje, vidjet ćemo osnovnu razliku prema statorski pojenom motoru u tome, što sinhrona kružnica leži nešto iznad apcise, dok je kod onog motora ležala znatno ispod nje (sl. 164).

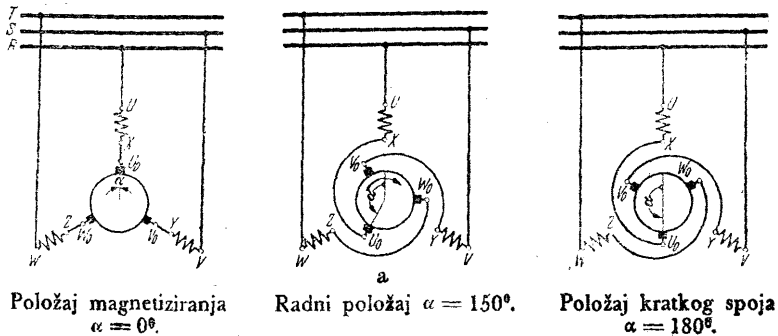


Sl. 164. Izmjerene krivulje mjesta (kružnice) mrežne struje nekompenziranog Schrageovog motora za položaj najmanje, sinhrone i najveće brzine vrtnje. Točka praznog hoda svih kružnica poklapa se praktički s točkom magnetiziranja P_0.

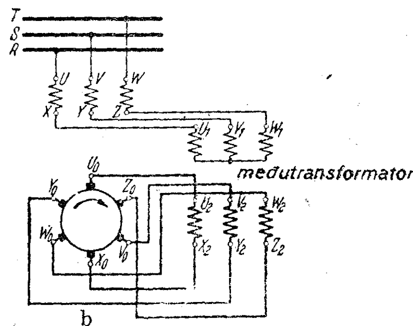
d) Trofazni serijski motor

Sastav i način rada. Trofazni serijski motor u najjednostavnijem spoju prema sl. 165a sastoji se od statora s normalnim trofaznim namotom, i rotora s namotom za istosmjernu struju priključenim na kolektor. Oba su namota spojena u seriju, tako da kroz njih teče ista struja. U t. zv. položaju magnetiziranja četkica leže osi statorskog i rotorskog namota u istom smjeru, te se oba namota potpomažu. Struja, koju uzimaju iz mreže, mala je. Kod pomaka četkica za 180° el dobivamo položaj kratkog spoja, u kojemu oba namota djeluju jedan nasuprot drugome. Struja, koju uzimaju, višestruka je normalna struja. U oba položaja zakretni moment, što ga stroj razvija jednak je nuli. U međupoložajima nosača četkica razvija mirni motor zakretni moment kao što je prikazan na sl. 166. Ovaj djeluje, bez obzira na smjer vrtnje okretnog polja, uvijek u takvom smjeru, da nastoji pokrenuti rotor iz položaja magnetiziranja nasuprot smjeru za-

kreta četkica. Da bismo izbjegli loša svojstva u radu, smijemo kod povećanja brzine zakretati četkice jedino nasuprot smjeru vrtnje polja. Motor se tada vrti u smjeru okretnog polja, dakle u istom smjeru, u kojemu bi se okretao kao asinhroni motor, kad bismo mu četkice kratko spojili.

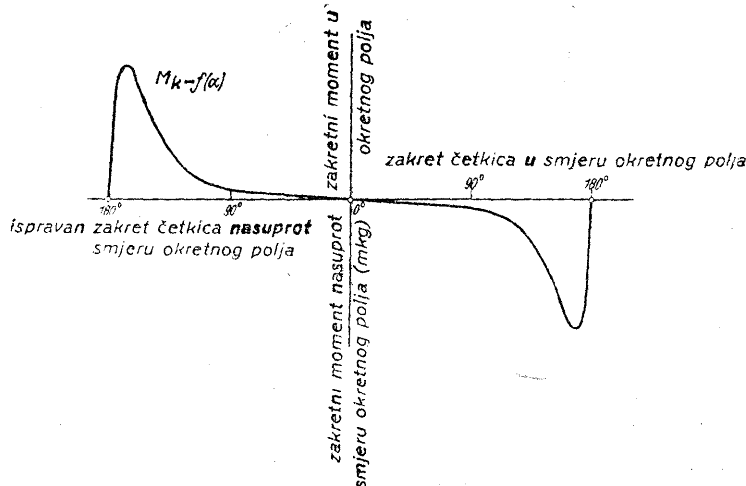


Položaj magnetiziranja $\alpha = 0^0$. Radni položaj $\alpha = 150^0$. Položaj kratkog spoja $\alpha = 180^0$.



Spoj sa šest četkica s međutransformatorom. Primarna strana može biti spojena i u trokut. Kod spoja s tri četkice otpadaju $X_0Y_0Z_0$, a $X_2Y_2Z^2$ međusobno spojimo.

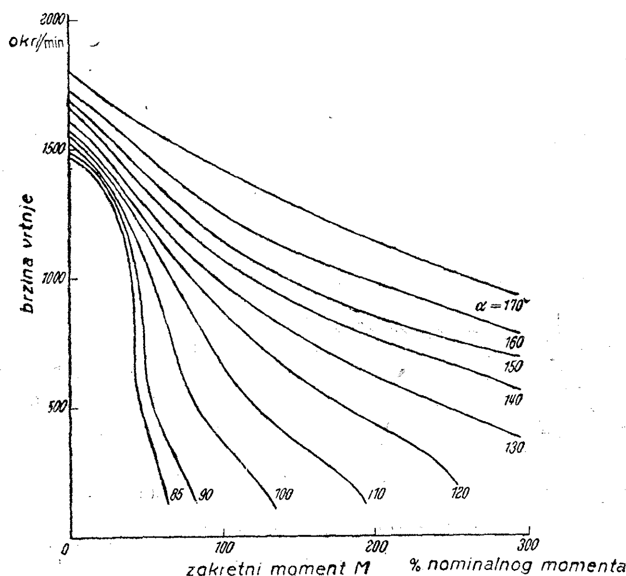
Sl. 165. Trofazni serijski kolektorski motor. Spoj bez međutransformatora (a) i sa međutransformatorom (b). Ispravan je zakret četkica nasuprot smjeru okretnog polja, dakle smjer vrtnje u smjeru okretnog polja.



Sl 166 Zakretni moment u mirovanju trofaznog serijskog motora. Kad pomaknemo četkice iz položaja magnetiziranja kod 0° motor kreće polako nasuprot smjeru zakreta, kad ih pomaknemo iz položaja kratkog spoja kod 180°, kreće naglo u smjeru zakreta.

Brzina vrtnje opterećenog motora jako pada, kad moment raste, motor se dakle ponaša kao istosmjerni serijski motor. Karakteristike brzina vrtnje - zakretni moment leže kod većih kutova zakreta α, kao što odgovara porastu momenta mirovanja s rastućim zakretom četkica, također više, tako da dobivamo jata krivulja prema sl. 167. Na tom se osniva mogućnost regulacije brzine vrtnje uz isti moment opterećenja.

Potpuno rasterećeni motor će pobjeći ili će mu većinom brzina vrtnje biti veća nego što to možemo dopustiti.



Sl. 167. Karakteristike brzine vrtnje trofaznog serijskog motora stabiliziranog zasićenim međutransformatorom (rezultati mjerenja).

Kod velikih kutova zakreta, preko 160 do 170°, zakretni moment će se opet smanjiti, zato ovo područje blokiramo graničnikom. Kod malih kutova zakreta, ispod cca 100°, moment većinom više ne dostaje. I ovo područje također blokiramo.

Promjenu smjera vrtnje smijemo vršiti jedino zamjenom dviju faza mreže i istovremenim pomakom nosača četkica u suprotnom smjeru, dakle nasuprot novom smjeru vrtnje. Ako je početni položaj nosača iznosio na pr. 100°, treba ga dakle prije svega zakrenuti za dvostruki iznos, t. j. za 200°, nasuprot novom smjeru vrtnje, da bismo došli u novi početni položaj. Namjesto prostornog zakreta možemo si pomoći i odgovarajućom cikličkom zamjenom dovoda do četkica. Na taj način dobivamo ekvivalentni zakret za 120, odnosno za 240°. Sama zamjena dviju faza mreže, naglasujemo, ne mijenja smjer vrtnje. Ako nismo sigurni, da li je motor ispravno

priključen ili reguliran, preporučuje se, da pokusno zamijenimo dvije faze mreže. Ispravan je onaj spoj, kod kojega je struja mreže primjetljivo manja.

Motor s međutransformatorom. U većini slučajeva napon mreže je veći od dopustivog napona na kolektoru, pa zato između statora i rotora uključujemo transformator. Najčešći spoj sa šest četkica prikazan je na sl. 165b. Transformator ima na primarnoj strani oko tri odvojka po fazi, kojima možemo udesiti tri različite vrijednosti prijenosnog omjera između statora i rotora. Ispitivanje kod opterećenja odlučuje, koji ćemo odvojak definitivno odabrati. Pod *prijenosnim omjerom* razumijevamo vrijednost:

$$k = w_a / w_{st}$$

kod motora bez međutransformatora, odnosno:

$$k = \frac{w_a}{w_{st}} \cdot \frac{w_{prim}}{w_{sek}}$$

kod motora sa međutransformatorom.

Pritom znači w djelotvorni broj zavoja statora, armature i transformatora, uz primjenu indeksa prema njihovom smislu.

Vrijednost k leži sasvim blizu 1,0. Većim brojem zavoja u rotoru ili većim brojem zavoja u primarnom namotu transformatora možemo je podići iznad 1. Veće vrijednosti k znače bolji faktor snage, jer rotor više sudjeluje kod magnetiziranja, ali pogoršavaju stabilno ponašanje motora kod malih brzina vrtnje, kao što ćemo to razjasniti dalje kod dijagrama. Uobičajen je omjer između 1,06 i 1,14, unutar kojih granica ga možemo udešavati predviđenim odvojcima na transformatoru. Kod ovih vrijednosti faktor snage pri sinhronoj brzini vrtnje iznosi cca 0,92, a kod većih brzina 1. Stabilnost pri tome još zadovoljava.

Sl. 168. Dijagram napona trofaznog serijskog motora s $k = 1{,}10$ (Motorski rad na luku P_k, P, A, O. Generatorski rad na preostalom luku.)

Utjecaj zasićenja: Jako zasićeni motor pokazuje kod velikih brzina vrtnje nepovoljne karakteristike brzina vrtnje-zakretni moment. Ove teku prestrmo, tako da male promjene opterećenja zahtijevaju veliku naknadnu regulaciju. Zato motor projektiramo s umjerenim zasićenjem. U ispitnoj stanici ne možemo više ništa mijenjati, jer odvojke na statorskom namotu ne predviđamo. Razumjet ćemo međutim, kako utječu promjene napona. Povećanje napona mreže utječe na motor nepovoljno.

Zasićenje međutransformatora uzimamo prilično visoko, jer to povoljno djeluje na ponašanje motora. U blizini sinhrone brzine vrtnje transformator je, naravno, uvijek nezasićen. Tamo je njegov utjecaj malen. Naprotiv, kod podsinhrone i kod nadsinhrone brzine vrtnje on se zasiti i prouzrokuje spljoštenje karakteristika. Ove čak sijeku ordinatu kroz nultočku, tako da motor može bez opasnosti ići rasterećen (sl. 167).

Dijagram serijskog motora (bez međutransformatora). Okretno polje inducira u statoru motora napon $\mathfrak{U}_{st}$, a u rotoru napon $\mathfrak{U}_{rot}$. Relativna veličina ovih određena je ukupnim prijenosnim omjerom k i klizanjem. Međusobni fazni položaj obaju napona uvjetovan je samo kutom zakreta četkica α, i to, budući da smo četkice zakrenuli nasuprot smjeru okretnog polja, $\mathfrak{U}_{rot}$ je u podsinhronom području za $\sphericalangle\ \alpha$ ispred $\mathfrak{U}_{st}$. Za apsolutne vrijednosti vrijedi:

$$U_{rot} = s \cdot k \cdot U_{st} .$$

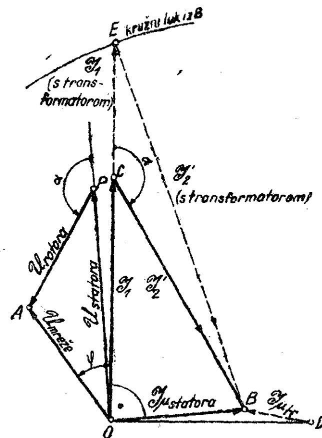
Vektorska suma obaju napona daje, ako zanemarimo padove napona, priključeni napon mreže $\mathfrak{U}_m$. Uz konstantni zakret četkica α bit će napon rotora $\mathfrak{U}_{rot}$ zakrenut za α prema $\mathfrak{U}_{st}$, bez obzira na brzinu vrtnje. Stoga možemo crtati dijagram napona prema sl. 168 kao kružnicu s obodnim kutom $(180^0 - \alpha)$ iznad napona mreže $\mathfrak{U}_{mr}$ kao tetive. $\mathfrak{U}_{st}$ dobivamo, ako spojimo bilo koju točku kružnice P s početnom točkom tetive, a $\mathfrak{U}_{rot}$, ako je spojimo s njenom krajnjom točkom, i to u mjerilu napona mreže $\mathfrak{U}_{mr}$. Klizanje možemo izračunati iz omjera obaju napona kao:

$$s = \frac{U_{rot}}{U_{st} \cdot k}$$

pri čemu je k = (napon mirovanja rotora : napon mirovanja statora)
= prijenos.

Magnetiziranje motora daje zamišljena struja magnetiziranja $\mathfrak{J}_\mu$, koja se sastoji od sume struje statora $\mathfrak{J}_1$ i ekvivalentne struje rotora $\mathfrak{J}'_2$ preračunane na statorski namot. U stvari teče u rotoru $\mathfrak{J}_1$. Kod preračunavanja trebalo bi dakle samo pomnožiti sa k, kad bi se osi namota podudarale s onima statora. Faktično su četkice pomaknute naprijed, nasuprot smjeru okretnog polja. Jednako magnetsko djelovanje imala bi struja po veličini jednaka $\mathfrak{J}_1$, no koja bi vremenski zaostajala u fazi za kut α, kad bi pojila četkice u položaju magnetiziranja. Zato dobivamo $\mathfrak{J}'_2$ kao struju, koja je k puta veća od $\mathfrak{J}_1$ te *zaostaje* za ovom za kut α. Sl. 169 prikazuje ukupni dijagram struje i napona kod određenog opterećenja. Razabiramo, da je struja $\mathfrak{J}_1$, t. j. mrežna struja, kod nepromijenjenog položaja četkica α pomaknuta prema statorskom naponu za konstantni, mali kut. Ostavimo li po strani utjecaj zasićenja, $\mathfrak{U}_{statora}$ i $\mathfrak{J}_1$ stoje međusobno u čvrstoj vezi. Stoga je $U_{statora}$ mjera za struju. Zakretni moment ovisi kvadratično o I_1,

pa je prema tome kvadrat od $U_{statora}$ direktna mjera za zakretni moment. Ako dakle $U_{statora}$ kod povećanja brzine vrtnje još raste, povećat će se zakretni moment. To dakle znači nestabilno ponašanje. Iz kružnog dijagrama na sl. 168 vidimo, da je područje od točke mirovanja P_k do točke, za koju $\mathfrak{U}_{statora}$ prolazi kroz središte kružnice još nestabilno. Odatle vidimo, da statorski napon, koji je manji od napona mirnog rotora uzrokuje nestabilnost. Ovome stanju odgovara vrijednost prijenosa k veća od 1,0. Jedino u slučaju, kad je k manje od 1,0, nema motor uopće nestabilnog područja, jer je $U_{statora}$ već unaprijed manje od U_{rotora}. Faktično vrijede ova razmatranja samo ako zanemarimo otpore, koji kod većine motora manje i srednje snage sprečavaju nestabilnost čak i kod vrijednosti k od cca 1,08 do 1,10.



Sl. 169. Dijagram napona i struje za podsinhronu radnu točku P na sl. 168 ne uzimajući (izvučeno), odnosno uzimajući (crtkano) u obzir struju magnetiziranja međutransformatora $\mathfrak{J}_{\mu_{tr}}$. 1. Konstrukcija bez $\mathfrak{J}_{\mu_{tr}}$ (izvučeno): $\mathfrak{J}_{\mu\,statora}$ zaostaje za 90° iza $\mathfrak{U}_{statora}$. Veličinu joj određujemo prema krivulji magnetiziranja motora. $\mathfrak{J}_1$ dobivamo iz uvjeta, da $\mathfrak{J}'_2$ mora biti k-puta veće, te da zaostaje u fazi iza $\mathfrak{J}_1$ za kut α. 2. Konstrukcija sa $\mathfrak{J}_{\mu_{tr}}$ (crtkano): Izvesti pređašnju konstrukciju. Nacrtati $\mathfrak{J}_{\mu_{tr}}$ sa šiljkom u B, tako da zaostaje za 90° iza $\mathfrak{U}_{rotora}$. Veličinu joj odredimo s krivulje magnetiziranja transformatora za napon $\mathfrak{U}_{rotora}$. Iz točke B povući kružni luk polumjera $BC \cdot \frac{OD}{OB}$. Sjecište E na produženju OC daje struju $\mathfrak{J}_1$ i struju $\mathfrak{J}'_2$ uzimajući u obzir struju magnetiziranja transformatora. U nadsinhronizmu pada P nalijevo od OA, D unutar trokuta OBC, a E ispod C na OC. $\mathfrak{J}_1$ uzimajući u obzir $\mathfrak{J}_{\mu_{tr}}$ bit će onda manje. $\mathfrak{J}_1$ je faktična struja statora, $\mathfrak{J}'_2$ struja rotora reducirana na broj zavoja i broj faza statora, te na položaj četkica 0°. (Konstrukcija vrijedi također i za motor bez međutransformatora.)

Dijagram serijskog motora (s međutransformatorom). Dijagram motora s međutransformatorom ne razlikuje se od prethodnoga, ako zanemarimo struju magnetiziranja, te uvrstimo mjesto stvarnog napona rotora primarni napon transformatora.

Treba li pak uzeti u obzir struju magnetiziranja, to moramo konstruirati dijagram prema sl. 169 (crtkano!). Konstrukcija dijagrama navedena je u tekstu. Vidimo, da se struja $\mathfrak{J}_1$ u podsinhronizmu povećava zbog struje magnetiziranja, dok se u nadsinhronom području smanjuje. To znači, da će motor kod iste brzine vrtnje u podsinhronizmu razvijati veći, a u nadsinhronizmu manji zakretni moment nego što bi ga razvio uz upotrebu nezasićenog transformatora. U stvari se dakle krivulja brzina vrtnje - zakretni moment kod upotrebe jako zasićenog transformatora splošti, t. j. motor se stabilizira.

Serijski motor s dvostrukim slogom četkica. Da bismo poboljšali ponašanje motora u pogledu brzine vrtnje, možemo serijski motor opremiti dvostrukim slogom četkica, pri čemu jedan od oba sloga ostaje u položaju magnetiziranja, dok drugi zakrećemo. Time postizavamo kod malih kutova zakreta položite karakteristike, te dobivamo finije udešavanje motora, jer se područje zakreta pomičnog nosača podvostručilo. Nasuprot tome stoji kompliciranost, koju ne možemo izbjeći. Stoga se motor s dvostrukim slogom četkica gotovo više i ne izvodi.

Samouzbuda. Kod serijskog motora imamo dvije vrste samouzbude s brojem perioda različitim od mreže, od kojih jedna nastupa kod generatorskog rada, a druga, važnija, kod motorskog rada.

Samouzbuda kod *generatorskog rada* nastupa, ako motor, koji radi kao generator, tjeramo izvana nasuprot njegovu pravom smjeru vrtnje. Ona nastupa već kod malih brzina, i to bez obzira na spoj primarne ili sekundarne strane stroja. Frekvencija joj je otprilike 2 do 5 Hz. Proizvedena struja je trofazna, te se zatvara praktički bez otpora preko mreže ili eventualno kratko spojenih stezaljki. Kod priključka na mrežu nastaje osim toga naravno i superponirana trofazna struja frekvencije mreže, koju smo i htjeli proizvesti. Protumjera kod nepoželjne samouzbude je visoko zasićenje motora i transformatora ili ugradnja otpornika. Prvo kvari cos φ, posljednje korisnost. Otpornik, koji nazivamo prigušnim otpornikom, možemo ugraditi primarno ili sekundarno, budući da predstavlja samo sredstvo za trošenje energije. Kod motorskog rada ga izvadimo. Dobro sredstvo protiv ove vrste samouzbude ne postoji.

U *motorskom radu* dolazi do samouzbude, jedino ako su na primarnoj strani statorski namot i namot transformatora spojeni u trokut, a rotor pojimo u spoju sa šest četkica. No upravo ovaj spoj je važan. Samouzbudna struja je *izmjenična struja,* koju proizvodi polje trostrukog broja polova. Ona pulzira u sve tri faze istovremeno i zatvara se unutar trokutnog spoja. Stoga se ona prema van ne očituje. Frekvencija joj je malena. Gore navedene mjere ne smijemo primijeniti, kako ne bi pokvarili tehnička svojstva motora. Možemo međutim, kao kod porednog motora, namotati primarni namot (tamo je to bio pomoćni namot) s korakom $^{2}/_{3}$ ili sekundarno primijeniti spoj u dvostruku zvijezdu. U prvom slučaju ne može se razviti uzbudno polje trostrukog broja polova, u drugom slučaju prekinut je galvanski put struje. Daljnje sredstvo je izvedba kratko spojenog ili u trokut spojenog namota na stupovima međutransformatora, koji sprečava pulzirajući tok, što prenosi nepoželjnu struju.

Udešavanje. Kod udešavanja serijskog motora nije potrebna tolika pomnja, kao što je bezuvjetno potrebna kod porednog motora. Najbolje

je priključiti motor na smanjeni napon i potražiti onaj položaj četkica, kod kojega je struja, koju motor uzima iz mreže, najmanja, a motor ne razvija zakretni moment ni nalijevo ni nadesno. To je položaj magnetiziranja, koji označimo. Zakretanjem za 180⁰ el, t. j. 180⁰ : p prostorno, naći ćemo položaj kratkog spoja, kod kojega i opet zakretni moment iščezava, no motor uzima maksimalnu struju.

Pogonski položaj nosača četkica dobivamo tako, da ga zakrenemo za cca 100⁰ : p do 150⁰ : p prostorno iz položaja magnetiziranja nasuprot smjeru vrtnje okretnog polja. p je polovina broja polova stroja.

Kut zakreta od položaja magnetiziranja s jedne strane i položaja kratkog spoja s druge strane pa do normalnog područja regulacije blokiramo graničnicima. Ove smjestimo tako, da motor možemo kod momenta, koji se najmanje zahtijeva još uvijek regulirati na najmanju brzinu vrtnje, koja se zahtijeva, a kod normalnog momenta da ga još uvijek možemo regulirati na najveću brzinu vrtnje.

Ispitivanje. *Pokuse praznog hoda* u pravom smislu riječi ne možemo izvesti na serijskom motoru. Izvodimo jedino pokus magnetiziranja na mirnom motoru, koji zasebno izvodimo i na transformatoru.

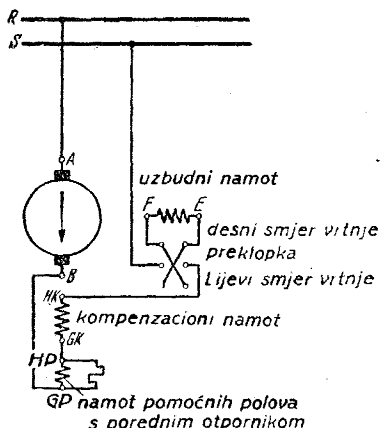
Pokuse kratkog spoja možemo izvesti zasebno na motoru, zasebno na transformatoru, te na oba zajedno u spoju u kojem će raditi. U posljednjem slučaju snimamo i moment mirovanja u zavisnosti o zakretu četkica α.

Pokuse opterećenja izvodimo najbolje, kao kod svih motora s regulacijom, dinamo-vagom. Ovu unaprijed uzbudimo, prije no što ćemo ukopčati serijski motor, da bismo isključili opasnost nedopuštena povećanja brzine vrtnje. Karakteristike snimamo uz konstantne položaje četkica, pri čemu svaki put priključujemo drugi odvojak međutransformatora. Konačno odabiramo onaj odvojak, kod kojega regulacija još zadovoljava, a istovremeno je faktor snage što bolji. Kako motor prema propisima (REM) treba da radi besprijekorno i kod napona mreže promijenjenog za $\pm 5\%$, ispitujemo ga kod novih tipova i kod ovih napona. Ponašanje u pogledu brzine vrtnje mora kod povećanog napona biti još uvijek besprijekorno.

Rezultate mjerenja nanosimo, kao i kod porednih motora, djelomično u zavisnosti o brzini vrtnje, a djelomično u zavisnosti o kutu zakreta četkica α. Korisnost određujemo najbolje također iz primljene i predane snage. Kod motora, koji su u radu spojeni u trokut, izvodimo mjerenja kod opterećenja također i u spoju zvijezda, ako se taj spoj upotrebljava kod malih brzina vrtnje i opterećenja, kao što to može biti slučaj kod pogona ventilatora. Prespojeni motor ima kod djelomičnog opterećenja bolju korisnost i veću stabilnost u pogledu brzine vrtnje.

e) Jednofazni serijski motor (željeznički motor)

Sastav i način rada. Jednofazni serijski motor izveden je u principu isto kao kompenzirani istosmjerni serijski motor. Spoj je prikazan na sl. 170. Od istosmjernog se motora razlikuje lameliranim statorom, oblikom glavnog pola i malim rasporom. U velikim utorima smješten je ozbudni namot, koji obuhvata pol, i namot pomoćnog pola, koji obuhvata komutacioni zub. U utorima polnog nastavka smješten je kompenzacioni namot, koji je spojen u seriju sa svim ostalim namotima. Ovaj služi uglavnom za poboljšanje faktora snage, a osim toga sprečava deformaciju polja zbog struje armature. Kad bi stroj izveli bez kompenzacionog namota, morala bi mreža dodatno dati punu snagu magnetiziranja armature u osi četkica. Armatura je opremljena normalnim namotom za istosmjernu struju, koji je izveden kao petljasti namot.



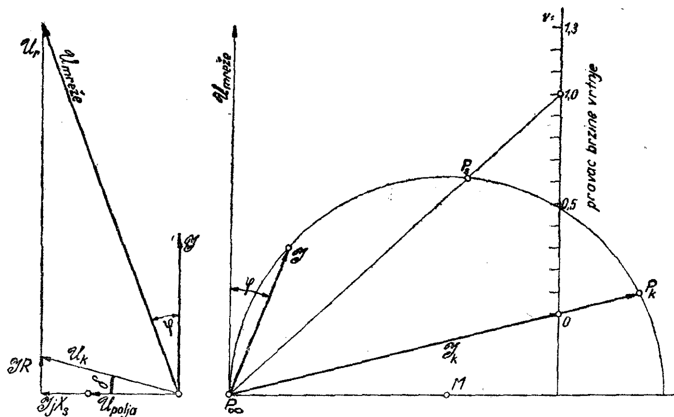
Sl. 170. Spoj jednofaznog serijskog motora.

Paralelno s namotom pomoćnih polova priključen je čisto djelatni, a gdjekada u seriju s ovim još i induktivni otpor. U namotu pomoćnih polova teče struja pomaknuta u fazi, tako da jedna njezina komponenta daje polje, koje poništava napon reaktancije, a druga daje polje, koje poništava napon transformacije u svitku, koji komutira.

Stroj, koji možemo priključiti na izmjeničnu struju bilo koje frekvencije ili na istosmjernu struju, ali ga obično upotrebljavamo samo **za željezničku frekvenciju** od 16 ²/₃ Hz, radi na slijedeći način. Struja, **koju stroj uzima iz mreže, teče kroz** uzbudni namot, te izaziva u osi glavnih polova pulzirajući magnetski tok Φ, koji s vodičima armature, u kojima teče ta ista struja, daje zakretni moment. Φ i I vezani su međusobno krivuljom zasićenja $\Phi = f(I)$. Zakretni moment je proporcionalan s njihovim produktom, tako da se mijenja kod nezasićenog stroja kvadratično, a kod jako zasićenog stroja gotovo linearno sa strujom I. Uz određenu struju I je gotovo nezavisan o brzini vrtnje. Kako međutim struja I s rastućom brzinom vrtnje pada, to pada i zakretni moment, kad brzina raste.

Dijagram. Sl. 171a prikazuje dijagram motora za određenu struju $\mathcal{J}$. Ukupni napon mreže $\mathcal{U}_{mr}$ sastoji se od djelatnog pada $\mathcal{J} \cdot R$ u fazi sa $\mathcal{J}$, te induktivnih padova zbog rasipa u armaturi, u namotu pomoćnih polova i kompenzacionom namotu, koji su svi zajedno predočeni s $\mathcal{J} \cdot jX_s$, induktivnog napona u uzbudnom namotu $\mathcal{J} \cdot jX_{polja} = \mathcal{U}_{polja}$, te napokon ko-

nisnog napona armature, koji je u fazi s $\mathcal{J}$ t. j. napona rotacije armature $\mathcal{U}_r$. Oba induktivna pada napona $\mathcal{J} \cdot jX_s$ i $\mathcal{U}_{polja}$ pomaknuta su za 90° naprijed prema struji. Ne treba zaboraviti, da su pojedini induktivni naponi, koje faktično imamo u namotu pomoćnih polova, kompenzacionom namotu kao i u armaturi, znatno veći od $\mathcal{J} \cdot jX_s$, ali se zbog protuspoja namota poništavaju sve do vrijednosti $\mathcal{J} \cdot jX_s$. Napon samoindukcije uzbudnog namota ne može se, po svojoj prirodi, smanjiti namotom u protuspoju. Malu djelatnu komponentu, koja se pojavljuje zbog paralelnog otpora uz namot pomoćnih polova, možemo i zanemariti. Kako je napon rotacije $\mathcal{U}_r$ točno proporcionalan s brzinom vrtnje, razabiramo, da napon mreže mora uz *konstantnu struju* $\mathcal{J}$ rasti, kad brzina vrtnje raste, i da se faktor snage, koji je određen kutom φ između $\mathcal{U}$ i $\mathcal{J}$ poboljšava, kad brzina vrtnje raste, ali ne može doseći vrijednost 1,0. U drugu ruku mora brzina vrtnje uz *konstantan napon mreže* jako spasti kad struja raste, pa možemo tako protumačiti serijsko ponašanje. Kod drugih struja treba rasipne napone i djelatni pad preračunati proporcionalno, a napon u uzbudnom namotu i napon rotacije preko karakteristike zasićenja.



a) Dijagram struje i napona b) Kružni dijagram nezasićenog motora

Sl. 171. Dijagram jednofaznog serijskog motora

Brzinu vrtnje motora reguliramo uvijek regulacijom dovedenog napona, koji uzimamo s odvojaka na sekundarnoj strani transformatora. Skok u naponu između dva uzastopna odvojka možemo dovoljno raspodijeliti t. zv. finom prigušnicom.

Smjer vrtnje motora mijenjamo posluživanjem reverzione sklopke u dovodu do uzbudnog namota.

Zanemarimo li u stvari vrlo važan utjecaj zasićenja, možemo za određeni napon konstruirati *kružni dijagram* prema sl. 171b, s kojega možemo

dobiti za svaku brzinu vrtnje struju i faktor snage, kao i pretvorenu snagu. Označene točke odgovaraju: P_K mirovanju, P_s »sinhronoj brzini« i P_∞ neizmjerno velikoj brzini. Pod »sinhronom« brzinom vrtnje smatramo brzinu vrtnje, koju bismo odredili iz broja polova i frekvencije mreže, no ona nema kod serijskog motora nikakva fizikalnog značenja.

Komutacija. Kad bismo serijski motor tjerali istosmjernom strujom, vrijedila bi u pogledu komutacije ista razmatranja kao kod istosmjernog stroja. U stvari nastaje komplikacija zbog pulzacije polja, jer se u kratko spojenom zavoju, osim napona reaktancije, pojavljuje još i napon transformacije, što ga inducira polje, pomaknut vremenski za 90°. Polje pomoćnog pola treba da što potpunije poništi i ovaj napon. Iz toga slijedi, da u namotu pomoćnog pola, osim same struje armature, treba da teče još i struja, zakrenuta za 90°. Prilike su ovakve: struja grane armature I_{gr}, koja komutira, inducira u kratko spojenom svitku srednji napon reaktancije:

$$e_r = H \cdot 2 \cdot l_ž \cdot w_s \cdot v_a \cdot SO \cdot 10^{-6} ,$$

te napon komutacije, induciran od polja pomoćnog pola, koji mu djeluje nasuprot:

$$e'_{pom} = 2 \cdot l_ž \cdot w_s \cdot v_a \cdot B'_{pom} \cdot 10^{-6} .$$

B'_{pom} je magnetska indukcija pod pomoćnim polom, koju stvara onaj dio faktične struje pomoćnog pola, koji je u fazi sa strujom armature. (Oznake su iste kao na str. 211). Kao kod istosmjernog stroja uzimamo uzbudu pomoćnog pola nešto jaču nego što bi izišlo prema relaciji $e_r = e'_{pom}$, t. j. kompenziramo nešto jače. To međutim znači, da je komutacija nešto preuranjena, dakle da se polje armature pomiče nasuprot smjeru vrtnje. Zbog toga dolazi do slabljenja glavnog polja, koje se pokazuje tako, što je induktivni napon na uzbudnom namotu uz istu struju smanjen prema naponu kod pokusa magnetiziranja, gdje pojimo samo uzbudni namot. Obrnuto, smanjeni induktivni napon na uzbudnom namotu ukazuje na natkompenzaciju kruga pomoćnih polova.

Napon transformacije, induciran u kratko spojenom svitku od pulzirajućeg toka Φ (u 10^6 maksvela) kod frekvencije mreže f, iznosi:

$$e_{tr} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot w_s \cdot \frac{f}{100} \cdot \Phi = K_1 \cdot f(I),$$

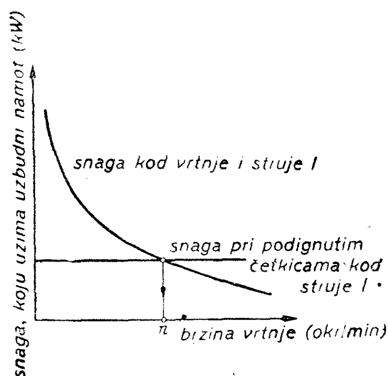
te je dakle nezavisan o brzini vrtnje i zavisi samo o struji I. Zbog otpornika, koji je spojen paralelno s namotom pomoćnih polova, teče u ovom struja, koja je pomaknuta u fazi prema struji armature. Njena komponenta, koja zaostaje za 90°, stvara indukciju B''_{pom}. Zbog gibanja u polju pomoćnog pola inducira se u svitku, koji komutira, još i napon komutacije:

$$e''_{pom} = 2 \cdot l_ž \cdot w_s \cdot v_a \cdot B''_{pom} \cdot 10^{-6} = K_2 \cdot n \cdot I,$$

koji je u protufazi s e_{tr}. Odmah ćemo razabrati, da poništavanje, koje želimo, može nastupiti za svaku pojedinu struju samo kod određene brzine vrtnje. Napose kod mirovanja i malih brzina ne možemo postići, da se naponi poništavaju. Zanimljivo je, kako djeluju struje kratkog spoja, izazvane razlikom napona (e_{tr} — e''_{pom}) na djelatni napon, dakle na snagu, koja prolazi kroz uzbudni namot, a možemo je mjeriti. Kod mirovanja je e''_{pom} jednako nuli. Zbog napona transformacije, koji dolazi potpuno do izražaja, teče u kratko spojenom svitku struja kratkog spoja i uzrokuje gubitke, koje mora pokriti isključivo uzbudni namot transformatorskim putem. Na osovini opažamo gubitke kao motorski moment, koji možemo mjeriti. Kod vrtnje počinje e''_{pom} djelovati u tom smislu, da se struje kratkog spoja smanje, pa je i povećanje snage u uzbudnom namotu manje. Kod one brzine vrtnje, kod koje, uz zadanu struju, napon komutacije e''_{pom} upravo poništava napon transformacije e_{tr}, struja kratkog spoja uopće više ne teče, a snaga, koju uzima uzbudni namot, jednaka je kao kod podignutih četkica. Kod još veće brzine postaje e''_{pom} veće od e_{tr}. To znači, da se struja kratkog spoja opet pojavljuje, ali sada je promijenila svoj smjer. Gubitke, koji nastaju, pokriva sada osovina, a to slabi njezin zakretni moment, dok uzbudni namot, zbog toga, što kratko spojeni svitak vraća energiju, uzima sada smanjenu snagu, što može u krajnjim slučajevima dovesti do generatorskog ponašanja uzbudnog namota. Obratno možemo dakle iz promjene snage, koju mjerimo na stezaljkama uzbudnog namota prema onoj pri podignutim četkicama, zaključiti na više ili manje potpuno poništavanje napona transformacije. Nastojimo postići potpuno poništavanje kod nominalne brzine vrtnje i nominalne struje.

Praktičko ispitivanje komutacije. U praksi određujemo broj zavoja namota pomoćnih polova i poredni otpor uz ovaj namot često sistematskim pokusima, kod kojih dodavanjem ili odvajanjem struje armature uz odgovarajuću promjenu porednog otpora tražimo najbolje uvjete komutacije. Mjerenje krivulje napona četkice u principu je doduše moguće, no obično nije izvedivo zbog nepristupačnosti kolektora. Prema Stieru možemo postupati na slijedeći način: Prvo ustanovimo komponentu struje, koja je u fazi, a koja je potrebna za poništavanje napona reaktancije, ispitivanjem komutacije kod istosmjerne struje. Zatim mijenjamo samo još okomitu komponentu struje prigušnicom i djelatnim otporom, te snimimo kod odgovarajuće vrijednosti struje armature krivulju snage, koju uzima uzbudni namot u zavisnosti o brzini vrtnje. Mjeriti možemo samo vatmetrom, koji daje puni otklon kod faktora snage 0,1 ili 0,3. Mjerene vrijednosti prikažemo prema sl. 172 u zavisnosti o brzini vrtnje, te istovremeno unesemo snagu, koju je uzimao uzbudni namot, izmjerenu pri podignutim četkicama. Ovo posljednje daje praktički, bez obzira na brzinu vrtnje, pa-

ralelu s apscisnom osi. Tamo, gdje se obje linije snage sijeku, napon komutacije e''_{pom} potpuno poništava napon transformacije e_{tr}. Pokusima možemo dakle induktivnu komponentu struje u pomoćnim polovima tako dugo mijenjati, dok kod određene brzine vrtnje snaga, koju uzima uzbudni namot, ne bude ista, kao što smo je izmjerili kod podignutih četkica. Natkompenzaciju, koju želimo postići zbog napona reaktancije, razabiramo po induktivnom naponu, dakle praktički ispravno po naponu na stezaljkama uzbudnog namota, koji mora biti cca 5% manji no što smo ga izmjerili kod iste struje i podignutih četkica.

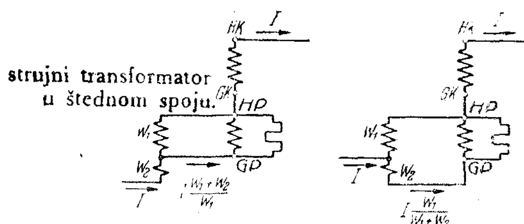


Sl. 172. Ispitivanje poništavanja napona transformacije e_{tr} naponom komutacije e''_{pom} uz konstantnu struju I u zavisnosti o brzini vrtnje. Mjerimo snagu, koju uzima uzbudni namot pri podignutim četkicama i u radu. Kod brzine vrtnje manje od n biti će $e'_{pom} < e_{tr}$, kod brzine vrtnje n biti će $e''_{pom} = e_{tr}$, a iznad toga $e''_{pom} > e_{tr}$. (Prema Stieru.)

Točno ispitivanje komutacije vršimo uvijek samo na prvom stroju tipa, a eventualne potrebne promjene izvršimo onda odmah i na ostalim motorima.

Dodavanje ili odvajanje struje armature vršimo kod jednofaznog serijskog stroja s pomoću strujnog transformatora u štednom spoju. Sl. 173 prikazuje oba pripadna spoja. Namot pomoćnih polova zajedno s porednim otpornicima možemo dakle pojiti povećanom ili smanjenom, no u fazi praktički nepromijenjenom strujom armature. Ako smo struju morali povećati, onda treba broj zavoja pomoćnog pola ili još i kompenzacionog namota povećati. Ako je struja armature bila prevelika, onda treba jedan ili više zavoja oduzeti. Promjena raspora kao kod istosmjernog stroja nije moguća.

Treba još primijetiti, da se kod generatorskog rada smjer napona transformacije e_{tr} okrene, i stoga treba ispred namota pomoćnih polova dodati djelatni otpor, a paralelno s oba ova otpora prigušnicu.



Sl. 173. Dodavanje i odvajanje struje u namotu pomoćnih polova kod potkompenziranog i kod natkompenziranog jednofaznog serijskog motora s pomoću strujnog transformatora u štednom spoju.

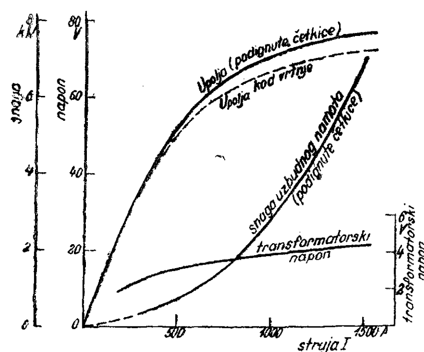
Ispitivanje. Kod prvih izvedaba pravimo većinu niže navedenih pokusa, dok se kod daljnjih motora možemo zadovoljiti samo nekima od njih. Ispitivanja se protežu na snimanje magnetiziranja pri mirovanju i kod vrtnje

u glavnoj i u poprečnoj osi stroja. K tome pridolaze mjerenja kratkog spoja pri mirovanju u normalnom spoju, te uz isključen uzbudni namot. Mjerenja opterećenja izvodimo u pogonskom spoju, te ih upotpunjujemo pokusima trajnog rada, da bismo odredili jednosatnu i trajnu snagu u zavisnosti o brzini vrtnje. Mjerenjem napona i snage na uzbudnom namotu opterećenog stroja, istražujemo i komutaciju s obzirom na poništavanje napona reaktancije i transformacije. Dalje ćemo označivati sa U_a, U_{ko}, U_{pom}, U_{polja} napone na namotu armature, kompenzacionom namotu, namotu pomoćnih polova i uzbudnom namotu.

P o k u s m a g n e t i z i r a n j a p r i m i r o v a n j u. 1. Magnetiziranje preko uzbudnog namota: Kod ovog pokusa moramo četkice podići, jer kad rotor miruje i ne teče struja, ne možemo kompenzirati napon transformacije. Magnetiziranje se vrši u glavnoj osi stroja. Mjerimo i nanosimo U_{polja}, e_{tr} i N_{polja} u zavisnosti o struji I. Izračunavamo i na isti način prikazujemo rasipni faktor i faktor slabljenja polja. *Rasipni faktor* određujemo iz omjera napona transformacije u armaturi i napona po zavoju uzbudnog namota, dakle:

$$\textbf{rasipni faktor } v = \frac{e_{tr} \cdot w_{polja}}{U_{polja}},$$

gdje w_{polja} znači broj zavoja uzbudnog namota. Ovaj faktor iznosi cca 0,88. U formuli se pretpostavlja, da armatura ima, kao što je to obično slučaj, samo jedan zavoj po lameli. e_{tr} mjerimo kao t. zv. napon među lamelama ispod podignutih četkica. *Faktor slabljenja polja* predstavlja



Sl. 174. Mjerenja u praznom hodu pri podignutim četkicama i pri magnetiziranju preko uzbudnog namota. Crtkana krivulja $U_{polja} = f(I)$ vrijedi, kad se motor vrti i pokazuje, budući da leži niže od krivulje mirovanja, da su pomoćni polovi s obzirom na napon reaktancije nešto preuzbuđeni, dakle da je $e_{pom} > e_{r}$.

omjer napona na uzbudnom namotu opterećenog stroja prema onome kod podignutih četkica. On je mjera za natkompenzaciju pomoćnog pola s obzirom na napon reaktancije. Kod motora s nešto natkomutacije iznosi faktor slabljenja polja cca 0,95, t. j. nešto ubrzana komutacija slabi polje u glavnoj osi za cca 5%. Uzbudni gubici, izmjereni kod pokusa na mirnom stroju, pokrivaju gubitke strujne topline u uzbudnom namotu i gubitke u

željezu kod mirovanja. Ako stroj potjeramo izvana, dobit ćemo gotovo točno jednake vrijednosti, jer gubitke u željezu rotora, koji rastu, moramo dovesti preko osovine. Sl. 174 pokazuje, kako se nanose rezultati.

2. Magnetiziranje preko kompenzacionog namota i namota pomoćnih polova: Kod ovog pokusa motor se magnetizira u poprečnoj osi. Ispod četkica nema nikakva napona transformacije, pa četkice mogu biti spuštene. Mjerimo (U_{ko} + U_{pom}), U_a i dovedenu snagu $N_1 = f(I)$.

3. Magnetiziranje preko namota armature: Armaturu priključimo na napon, te provedemo ista mjerenja kao prije. Iz omjera napona, koje dobivamo iz oba pokusa, izračunamo rasipni faktor između namota armature, te kompenzacionog namota zajedno s namotom pomoćnih polova:

$$\text{rasipni faktor } v = \sqrt{\frac{U'_a}{U'_{ko} + U'_{pom}} \cdot \frac{U''_{ko} + U''_{pom}}{U''_a}},$$

pri čemu uzimamo vrijednosti U' iz prvog pokusa (2), a vrijednosti U'' iz drugog pokusa (3) uz iste iznose AZ. Rasipni faktor iznosi oko 0,88.

P o k u s k r a t k o g s p o j a p r i m i r o v a n j u. 1. Kratki spoj čitavog motora: Normalno spojeni motor priključimo na napon. Mjerimo I, N, M, $\cos\varphi = f(U)$, te nanosimo, osim ovih veličina, još i karakterističnu vrijednost N/M u kVA/mkg.

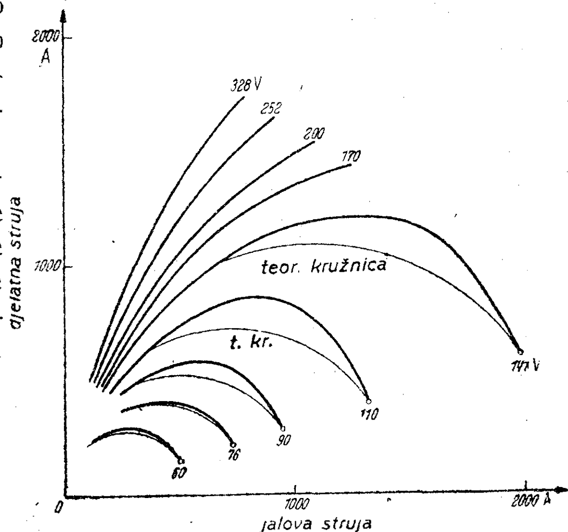
2. Kratki spoj motora uz isključen uzbudni namot. Pojimo samo namot armature, kompenzacioni namot i namot pomoćnih polova, te mjerimo U_{ukupni}, U_a, U_{ko}, U_{pom}, $N = f(I)$. Zakretnog momenta nema. Kod tog pokusa ne treba zaboraviti, da je ukupni napon obaju namota statora znatno veći od priključenog napona.

3. Kratki spoj armature pri uzbuđenom kompenzacionom namotu i namotu pomoćnih polova, i kratki spoj obaju posljednjih namota pri uzbuđenom namotu armature. Ove pokuse izvodimo samo da bismo dobili podloge za proračun.

P o k u s m a g n e t i z i r a n j a k o d v r t n j e. 1. Magnetiziranje preko uzbudnog namota. Rotor tjeramo baždarenim pomoćnim motorom. Mjerimo snagu dovedenu rotoru, koja je jednaka gubicima u željezu, što ih pokriva rotor. Rezultat prikazujemo bilo u obliku $N_ž = f(n)$ kod konstantnih vrijednosti napona na uzbudnom namotu U_{polja}, bilo kao $N_ž = f(U_{polja})$ kod konstantnih vrijednosti brzine vrtnje.

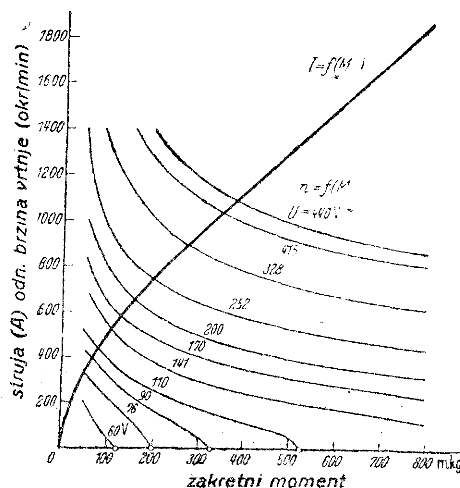
2. Magnetiziranje preko namota pomoćnih polova i kompenzacionog namota: Ovaj pokus odgovara prethodnom, samo treba umjesto napona na uzbudnom namotu, koji je sada jednak nuli, uzeti napon na uzbuđenom namotu statora, t. j. $U_{ko} + U_{pom}$.

Pokusi opterećenja. Snimanje radnih karakteristika: Motor tjeramo pri različitim naponima $U_1, U_2, \ldots U_n$, koje uvijek tokom jednog niza opterećenja držimo konstantnima. Opterećujemo gotovo isključivo dinamo-vagom, jer s pomoću ove određujemo i korisnost. Određivanje korisnosti metodom pojedinačnih gubitaka vrlo je komplicirano, a kako gubitke u željezu i dodatne gubitke ne možemo točno uzeti u obzir, nije točnije od direktne metode. Iz rezultata pokusa opterećenja odredimo krivulje: η, $\cos \varphi$, n, I, $N_1 = f(M)$, ili $f(I)$; u tom slučaju prikažemo M namjesto I. Utjecaj brzine vrtnje na zavisnost momenta M o struji I jedva možemo kod mjerenja primijetiti. Stoga možemo ponešto razasute točke pojedinih nizova opterećenja spojiti jednom jedinom krivuljom, koja vrijedi kod mirovanja i kod svih brzina.



Sl. 175. Mjerene krivulje mjesta jednofaznog serijskog motora uz konstantne vrijednosti mrežnog napona. (Tanko je ucrtano nekoliko teoretskih kružnica nezasićenog motora.)

Na osnovu mjerenja opterećenja možemo nacrtati faktične krivulje mjesta motora, koje primjetljivo odstupaju od teoretskih kružnica nezasićenog stroja, kao što se vidi sa sl. 175. S ovog prikaza možemo očitati: struju, faktor snage, snagu mreže i zakretni moment. Ovaj posljednji je kod konstantnih vrijednosti struje također konstantan, tako da točke istog momenta leže na kružnicama oko ishodišta. Na sl. 176 vidimo uobičajeni način prikazivanja rezultata mjerenja.



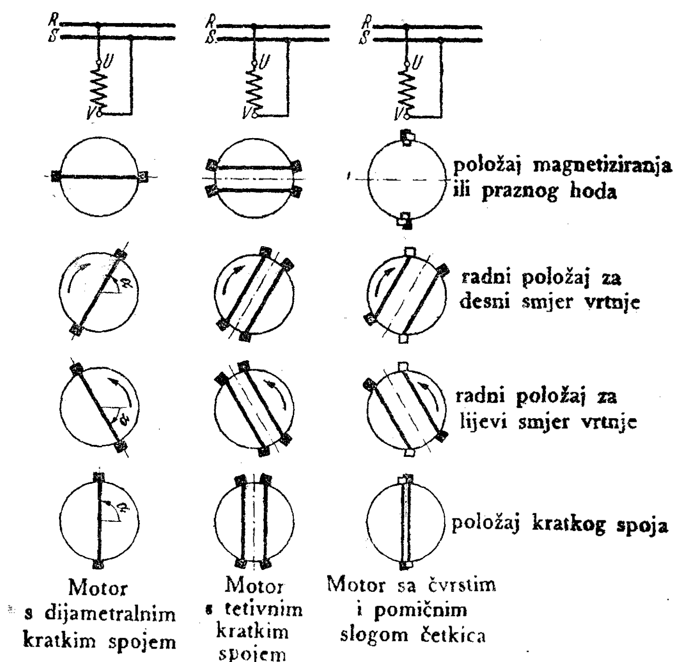
Sl. 176. Karakteristike brzine vrtnje i struje jednofaznog serijskog motora u zavisnosti o zakretnom momentu. (Ista mjerenja kao na sl. 175.)

Trajni rad. Na serijskom motoru izvodimo niz ispitivanja u trajnom radu kod kojih određujemo graničnu snagu za jednosatni pogon i za trajni pogon u zavisnosti o brzini vrtnje. Zbog energičnog hlađenja sta-

tora i rotora, koje se provodi odvojeno, razlikuju se obje snage međusobno samo za mali postotak. Granična snaga raste u početku linearno s brzinom vrtnje, no iznad cca 80% maksimalne brzine povećava se samo još malo, zbog naglog porasta dodatnih gubitaka.

f) Repulzioni motor

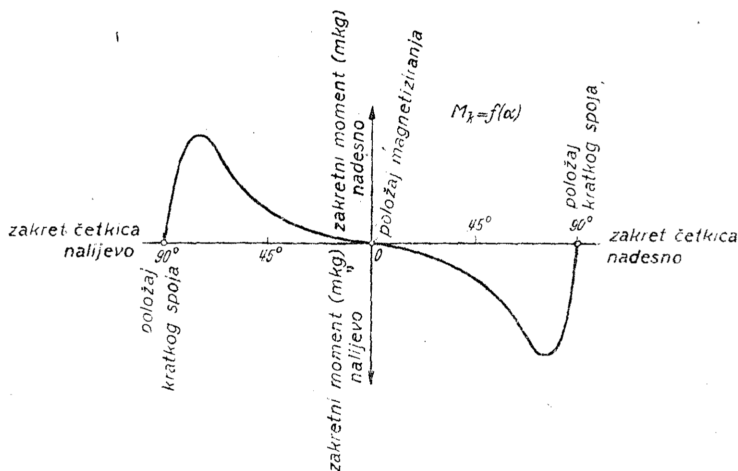
Sastav i način rada. Repulzioni motor je indirektno pojeni jednofazni kolektorski motor sa serijskim ponašanjem, kojemu možemo regulirati brzinu vrtnje zakretanjem četkica. Sastoji se od statora s porazdijeljenim namotom, koji je priključen na mrežu bilo kojeg napona, te od armature



Sl. 177. Spoj i karakteristični položaji osi četkica repulzionog motora s dijametralnim kratkim spojem (a), s tetivnim kratkim spojem (b) i s dvostrukim slogom četkica (c, Déri-motor).

s namotom za istosmjernu struju, koji je preko četkica na kolektoru sam u sebi kratko spojen. Prema načinu kratkog spajanja razlikujemo motor s jednostrukim, pomičnim slogom četkica, s udaljenošću između kratko spojenih četkica od 180°el, zatim motor također s jednim, pomičnim slogom, no sa četiri reda četkica po paru polova, koji su međusobno spojeni u parove, tako da međusobno zatvaraju kut od 120 do 150°el, te napokon Déri-motor, koji ima dva sloga četkica. Jedan miruje, dok je drugi pomičan. Kratkospojne veze idu od četkica jednog sloga do onih drugog sloga. Kut među njima možemo mijenjati od 0° do 180°el (sl. 177a-c).

O ponašanju motora odlučuje položaj osi četkica. Ovu predstavlja simetrala kratkospojnih veza u dvopolnoj slici. Os četkica ima dva osobita položaja. Ako se ona podudara s osi statorskog namota, motor djeluje na mrežu kao transformator u kratkom spoju. Struja, koju uzima iz mreže, vrlo je velika. Zakretni moment, koji motor razvija u položaju kratkog spoja, jednak je nuli .Zakrenemo li os četkica za 90°el, dolazi ona u položaj praznog hoda. U rotoru ne teče struja, izuzev struje kratkog spoja u svicima, koji su premošteni četkicama, te motor djeluje kao prigušnica. On uzima iz mreže samo struju magnetiziranja. Zakretni moment jednak je također nuli. U međupoložajima motor razvija zakretni moment. Ovaj djeluje uvijek u takvu smjeru, da rotor teži da se najkraćim putem za-

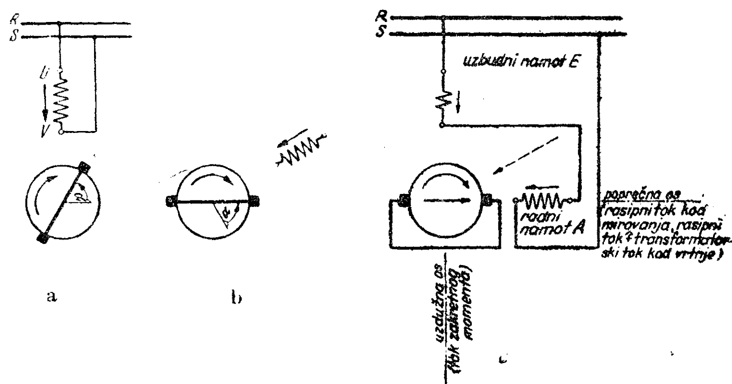


Sl. 178. Zakretni moment u mirovanju repulzionog motora. Motor kreće iz položaja magnetiziranja polako *nasuprot* smjeru zakreta četkica, odnosno iz položaja kratkog spoja naglo *u smjeru* zakreta.

krene iz položaja, koji određuje os četkica u položaj praznog hoda, t. j. poprečni položaj s obzirom na statorski namot. Kod zakreta osi četkica iz položaja praznog hoda motor kreće polako nasuprot smjeru zakreta, kod zakreta iz položaja kratkog spoja kreće, naprotiv, naglo u smjeru zakreta. To je odmah razumljivo iz prikaza momenta mirovanja u zavisnosti o kutu zakreta na sl. 178.

Kod bilo kojeg zakreta osi četkica iz položaja praznog hoda za kut α, najbolje je da zamislimo statorski namot rastavljen u dva zasebna namota, smještena razmaknuto za kut od 90°el, od kojih jedan leži okomito na os četkica, a drugi paralelno s njom (sl. 179a-c). Namot, koji stoji okomito, zove se uzbudni namot, a onaj u smjeru osi, zove se radni namot. Njihovi zamišljeni brojevi zavoja zavise o $\cos\alpha$, odnosno o $\sin\alpha$. Oba namota djeluju kod *mirovanja* slično kao uzbudni i kompenzacioni namot jednofaznog serijskog motora. Uzbudni namot uzbuđuje u uzbudnoj osi

t. zv. tok zakretnog momenta. Namot armature i radni namot sačinjavaju zajedno transformator u kratkom spoju, koji prenosi mrežnu struju na rotor. Prenosni omjer zavisi o kutu zakreta α. Kako je polje u uzbudnoj osi vremenski u fazi s induciranom strujom armature, postoje povoljni uvjeti za jak potezni moment. Tok u poprečnoj osi je samo rasipni tok. On je u fazi sa strujom. Na radnom namotu imamo samo rasipni napon radnog namota i namota armature, koji otprilike odgovara naponu na kompenzacionom namotu, namotu pomoćnih polova i namotu armature kod jednofaznog serijskog motora. Najveći dio napona mreže otpada na uzbudni namot, na kojemu imamo puni induktivni napon, koji odgovara toku zakretnog momenta u uzdužnoj osi.



Sl. 179. Zamišljeno ili faktično rastavljanje statorskog namota na uzbudni i radni namot. Motor, kojemu je os četkica zakrenuta za kut α (a); prikaz zakrenut za kut α prema natrag (b); provedeno rastavljanje statorskog namota (c).

Kad se motor počne *okretati*, prilike se bitno promijene u usporedbi s onima kod željezničkog motora. Zbog rotacije vodiča armature u polju inducira se u ovima u uzdužnoj osi EMS, koju ne možemo mjeriti u krugu armature zbog kratkog spoja na četkicama. No ova uzrokuje dodatnu struju u namotu armature, koja je jako pomaknuta u fazi prema induciranoj struji kratkog spoja kod mirovanja. Ova struja proizvodi u smjeru osi četkica tok, koji je međutim prema statorskoj struji vremenski pomaknut gotovo za 90^0. Ovaj tok zove se transformatorski tok i on prenosi napon rotacije rotora na radni namot. Tamo se ovaj dakle pojavljuje praktički u fazi sa mrežnom strujom. On se vektorski zbraja s rasipnim naponom. Kako je ukupni napon na oba statorska namota određen naponom mreže, mora napon na uzbudnom namotu pasti. Prema tome će se tok u uzdužnoj osi smanjiti, kad brzina vrtnje poraste. To znači, da će se motor ponašati serijski, jer zakretni moment pada kad brzina raste.

Motor, koji se vrti, pokazuje prema tome tri različita toka. Tok u uzdužnoj osi u fazi je sa mrežnom strujom. Poprečno polje armature ne

može se razviti, izuzev mali rasipni tok. Ono je također u fazi sa mrežnom strujom. Transformatorski tok je također poprečni tok. On je vremenski pomaknut prema mrežnoj struji gotovo za 90°. Kako je prostorno zakrenut za 90° prema toku u uzdužnoj osi, daje s ovim nepotpuno eliptičko okretno polje. To je osnovna razlika prema željezničkom motoru, gdje imamo čisto izmjenično polje.

Strujni dijagram motora kod konstantnog napona mreže je kružnica, sa središtem ispod apscisne osi. Podjela brzine ista je kao kod željezničkog motora.

Tri izvedbe kratkog spoja četkica. Motor s jednostrukim slogom četkica i dijametralnim kratkim spojem i motor s tetivnim kratkim spojem ne razlikuju se u ponašanju. Kad motor stoji, pojavljuje se u svitku, koji je preko četkice kratko spojen, napon transformacije, induciran od uzbudnog polja, koje pulzira. Ovaj napon može uzrokovati, da se četkica zažari. Obje ove vrste motora ne smiju zato ni u položaju praznog hoda ostati priključene na napon. Razlika među njima je ta, što motor s tetivnim kratkim spojem ima polje s manje nadvalova, i zbog toga bolje uvjete komutacije. Kod većih jedinica radije ga odabiramo.

Motor s dvostrukim slogom četkica ima tri prednosti. Prvo: kut zakreta pomičnih četkica dva puta je veći nego kod drugih strojeva. Time postizavamo finiju regulaciju. Drugo: bolje se ponaša s obzirom na brzinu vrtnje. Treće: kad motor stoji u položaju za pokretanje, nema ispod četkica napona transformacije. Stoga motor može u tom položaju ostati priključen na napon, te je osobito prikladan za često pokretanje i za rad u oba smjera vrtnje. Njegovoj češćoj primjeni stoji međutim na putu znatna komplikacija zbog čvrstog i pomičnog nosača.

Udešavanje nosača četkica. Motor s jednostrukim slogom četkica priključimo na sniženi napon i zakrećemo nosač tako dugo, dok ne udesimo, da uzima minimalnu struju i da se ne okreće. Ovaj položaj nosača označimo. Kad zakrenemo četkice iz tog položaja, mora motor polako krenuti u suprotnom smjeru. Ako pak naglo krene u istom smjeru, našli smo zabunom položaj kratkog spoja, koji je od položaja praznog hoda udaljen za 90°el. Prepoznajemo ga osim toga po tome, što je struja kratkog spoja znatno veća.

Kod Déri-motora potražimo ponajprije položaj kratkog spoja. Četkice obaju nosača, koje nisu međusobno spojene kratkospojnim vezama, stoje prostorno jedna do druge, struja, koju uzima motor je maksimalna, zakretni moment nula. Jedan nosač ostavimo trajno u tom položaju, dok pomični nosač zakrećemo dalje za 180°el, dakle za korak četkica. Mrežna struja mora tada biti minimalna, zakretni moment mora biti opet nula, a četkice obaju nosača, ovaj puta one, koje su međusobno spojene, stoje

prostorno jedna do druge. To je položaj, koji ćemo označiti kao položaj praznog hoda.

Da bi se četkice ubrusile, zakrenemo sada nešto malo nosač, dok neopterećeni motor ne dosegne nominalnu brzinu vrtnje. Ostavimo ga nekoliko sati da radi neopterećen.

Magnetiziranje i kratki spoj. Magnetiziranje izvodimo uz podignute četkice, dok motor miruje. Kod pokusa kratkog spoja snimamo na mirnom motoru krivulju zakretnog momenta, mrežne struje i primljene snage u zavisnosti o zakretu osi četkica iz položaja praznog hoda i to što bliže položaju kratkog spoja. Kod većih motora treba ova mjerenja izvesti vrlo brzo.

Pokusi opterećenja. Motore bez regulacije brzine vrtnje, koji rade s konstantnim položajem četkica, opteretimo nominalnim momentom, te zakrećemo nosač, dok ne dosegnemo nominalnu brzinu vrtnje. Ovaj radni položaj, koji je cca 70^0 udaljen od položaja praznog hoda, označimo. Isto tako označimo položaj za drugi smjer vrtnje, koji leži s druge strane nul-položaja. Očitanja kod opterećenja nanosimo u zavisnosti o promjenljivom zakretnom momentu.

Kod motora s regulacijom brzine vrtnje snimamo daljnje karakteristike za promijenjene položaje četkica u području najvećih i najmanjih brzina vrtnje. Kod novih izvedaba pravimo još i pokuse s povećanim i smanjenim naponom, da bismo ustanovili optimalnu vrijednost s obzirom na korisnost i faktor snage.

Graničnici sprečavaju zakret nosača preko 80^0 idući prema položaju kratkog spoja.

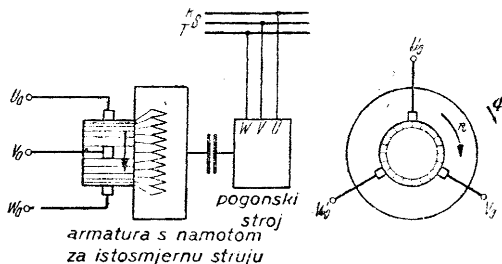
Neki proizvođači nazivaju položaj kratkog spoja »pravim neutralnim položajem«, a položaj praznog hoda »krivim neutralnim položajem«. Oni promatraju zakret počevši od položaja kratkog spoja, koji nije blokiran. Oznake za lijevi i desni smjer vrtnje leže stoga tik jedna do druge.

Korisnost određujemo, kao kod svih ostalih izmjeničnih kolektorskih strojeva, s pomoću baždarenog stroja za opterećenje ili dinamo-vagom.

Promjena smjera vrtnje. Ovu vršimo zakretom nosača četkica u suprotnom smjeru. Jedino kod motora s dva namota na statoru, koje možemo po izboru priključiti na mrežu, možemo odstupiti od toga. Kod motora s trofaznim namotom pojimo *UV* za jedan smjer vrtnje, a *UW* za drugi. Os četkica je onda za $\pm 60^0$ zakrenuta prema položaju magnetiziranja.

g) Trofazni uzbudni stroj bez statora, s vlastitom uzbudom

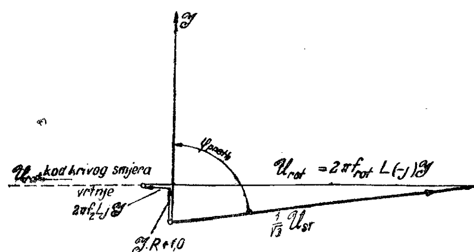
Sastav i način rada. Trofazni uzbudni stroj bez statora, s vlastitom uzbudom, sastoji se od armature za istosmjernu struju sa zatvorenim utorima; njihovi visoki svodovi nadomještaju u magnetskom pogledu stator koji je izostavljen. Kolektor ima na svakih 360°el po tri reda četkica, koje su priključene na tri stezaljke armature $U_0V_0W_0$ (sl. 180). Ove stezaljke spojimo kod spoja prema sl. 89 (str. 154) sa tri klizna koluta asinhronog motora, kojemu želimo popravljati fazu.



Sl. 180. Trofazni uzbudni stroj bez statora, s vlastitom uzbudom. Vrtnja u smjeru okretnog polja. Brzina cca 10-erostruki do 20-erostruki nadsinhronizam

Uzbudni stroj tjeramo malim motorom, koji treba da svlada samo gubitke trenja. No njegov potezni moment mora svakako dostajati da pokrene uzbudni stroj nasuprot velikom momentu mirovanja.

Rad uzbudnog stroja razumjet ćemo na osnovu *dijagrama,* prikazanog na sl. 181. Sa $\mathcal{J}$ označimo pridolazeću struju, koja može varirati od nule do pune vrijednosti, prema opterećenju asinhronog motora. U fazi s $\mathcal{J}$ leži djelatni pad napona $\mathcal{J} \cdot R + 1{,}0$. R je otpor faze zamišljene zvijezde između četkice i središta armature. On iznosi 4/9 otpora za istosmjernu struju mjerenog na polnom koraku. Sa 1,0 uzimamo u obzir pad napona na jednoj četkici. 90° u fazi ispred $\mathcal{J}$ leži induktivni pad napona $2\pi f_z \cdot L \cdot j\,\mathcal{J}$ Ovaj bismo mogli izmjeriti na mirnom uzbudnom stroju, koji djeluje kao prigušnica. 90° natrag u fazi leži korisni napon $2\pi f_{rot} \cdot L\ (-j)\ \mathcal{J}$ proizveden rotacijom u *smjeru* okretnog polja. f_2 označuje frekvenciju klizanja struje, f_{rot} frekvenciju rotacije, koja je određena brojem polova i brzinom vrtnje uzbudnog stroja, a L induktivitet uzbudnog stroja po fazi zvijezde. Ovaj jako zavisi o struji $\mathcal{J}$ zbog jakog zasićenja stroja. Frekvencija klizanja iznosi cca 3 do 4 Hz, frekvencija rotacije cca 30 do 50 Hz, tako da preostaje iskoristiva frekvencija vodiča u okretnom polju od 27 do 47 Hz.



Sl. 181. Dijagram uzbudnog stroja s vlastitom uzbudom, crtan za zamišljenu fazu zvijezde.

Ukupni napon na stezaljkama jako zaostaje prema struji $\mathcal{I}$ ili drugačije rečeno, uzbudni stroj djeluje kao potrošač, koji uz priključeni napon $\mathcal{U}$ uzima struju jako naprijed u fazi, dakle kapacitivnog karaktera. Takav potrošač popravlja fazu asinhronog motora, kojemu je priključen na klizne kolute.

Ne treba međutim zaboraviti, da se uzbudni stroj ponaša drugačije nego kondenzator, jer mu otpor sasvim drugačije zavisi o frekvenciji. Vrijedi:

uzbudni stroj (bez gubitaka) $\frac{U}{I} = 2\pi L\,(f_{rot} - f_2)$

kondenzator (bez gubitaka) $\frac{U}{I} = \frac{1}{2\pi f_2 C}$,

iz čega slijedi, da kondenzator uz konstantni napon uzima struju, koja raste linearno s frekvencijom, dok kod uzbudnog stroja struja zavisi tek u drugom redu o frekvenciji f_2, a u prvom redu zavisi o brzini vrtnje, kojom ga tjeramo, jer uzimamo $f_{rot} \gg f_2$.

Ispitivanje uzbudnog stroja sastoji se, pošto je izmjeren otpor armature na polnom koraktu, od snimanja *karakteristike magnetiziranja* $U_j = f(I)$, i od *zajedničkog ispitivanja* s prednjim motorom.

Stroju dovodimo promjenljivi napon U uz frekvenciju klizanja f_2 i uz pogon brzinom vrtnje n. Mjerimo struju I, koju uzima i primljenu snagu N. Ova služi za pokrivanje gubitaka strujne topline u armaturi, dodatnih gubitaka, gubitaka u željezu i gubitaka prijelaza na četkicama. Osim toga mjerimo snagu, koju uzima pogonski motor i koju u cijelosti pribrajamo gubicima uzbudnog stroja. Mjerenje snage na kolektorskoj strani dosta je nezgodno. Najbolje je uzeti dvostruki vatmetar, sa dva mjerna sistema na zajedničkoj osovini, jer na taj način dobivamo vremenski konstantan otklon. Jalovi napon U_j dobivamo kao $U \cdot \sin\varphi$; kako $\cos\varphi$ praktički iznosi 0,20, dakle $\sin\varphi \approx 0{,}98$, možemo uzeti, da je U_j jednak 98% napona na stezaljkama.

U prikazujemo kao funkciju struje I. Ako smo mjerenja vršili kod promjenljive frekvencije klizanja f_2 i promjenljive brzine vrtnje n, kojom gonimo stroj, možemo preračunati rezultat na frekvenciju klizanja nula i brzinu vrtnje n_0 prema jednadžbi:

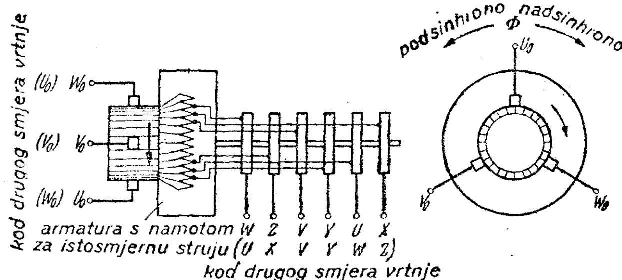
$$U_{j_0} = 0{,}98 \cdot U \cdot \frac{n_0}{n - \frac{120 \cdot f_2}{2p}}.$$

Položaj četkica uzbudnog stroja može biti koji god. Jedino redoslijed faza četkica moramo održati ispravnim, i to u smjeru vrtnje treba da slijede četkice U_0, V_0, W_0. Samo u slučaju, kad bismo htjeli kompenzirati asinhroni generator, trebalo bi dvije faze zamijeniti.

U slučaju da je gubitke teško odrediti, možemo od toga odustati. Ukupne gubitke glavnog asinhronog motora u krugu armature izračunavamo onda iz snage u rasporu i iz klizanja. Tu su onda sadržani gubici uzbudnog stroja, izuzev gubitke trenja. Ove dobivamo zajedno s vlastitim gubicima malog pogonskog motora iz snage, koju taj uzima iz mreže.

h) Pretvarač frekvencije

Sastav i način rada. Pretvarač frekvencije u najjednostavnijoj izvedbi sastoji se od rotora za istosmjernu struju s namotom, priključenim na



Sl. 182. Pretvarač frekvencije bez statora. Klizanje mora biti jednako klizanju pripadnog glavnog asinhronog stroja. Napon između četkica $U_0 V_0 W_0$ jednak je — ako zanemarimo padove napona — onome između kliznih koluta $U V W$, bez obzira na brzinu vrtnje. Označeni redoslijed faza vrijedi za podsinhronu brzinu. Okretno polje Φ rotira kod podsinhronizma nasuprot mehaničkom smjeru vrtnje, kod nadsinhronizma u smjeru vrtnje.

kolektor i na tri ili šest kliznih koluta. Duboki, zatvoreni utori nadomještaju stator, kao kod uzbudnog stroja bez statora. Priključci triju koluta UVW međusobno su razmaknuti za 120°el. Kod izvedbe sa šest koluta razmaknuti su UVW i XYZ međusobno uvijek po 120°el, dok kut između U i X, V i Y, te W i Z može iznositi ili 180°el ili 150 do 160°el. Skraćenje daje polje s manje nadvalova, a zbog toga i poboljšanje komutacije. (Sl. 182).

Pretvarač frekvencije radi kao asinhroni jednoarmaturni pretvarač. Klizni koluti priključeni su preko transformatora na mrežu. Dovodimo im konstantni napon. Na kolektorskoj strani pojavljuje se on u punoj veličini, ako uzmemo kao osnovu napon na kliznim kolutima između U i V. Kad je kolektor neopterećen, uzimaju klizni koluti samo malu struju magnetiziranja. Čim kolektor opteretimo, poveća se struja na kliznim kolutima za odgovarajući iznos. Brzina vrtnje ne utječe na visinu naponà. O njoj zavisi samo frekvencija. Pretvarač frekvencije, koji se vrti podsin-

hrono nasuprot smjeru okretnog polja, daje na četkicama kolektora frekvenciju **klizanja**.

Redoslijed faza četkica na kolektoru mora biti kod podsinhronizma $U_0V_0W_0$ nasuprot smjeru vrtnje. Položaj nosača određuje fazni položaj napona. Naponi prethode u fazi, kad nosač zakrenemo u smjeru vrtnje, a zaostaju u fazi, kad nosač pomičemo nasuprot smjeru vrtnje. Spoj s asinhronim strojem, kojemu želimo regulirati fazu ili brzinu vrtnje, prikazan je na str. 148, sl. 85.

Ispitivanje se sastoji od *snimanja karakteristike magnetiziranja* sa strane kliznih koluta. Pravi smjer vrtnje prepoznat ćemo po frekvenciji na kolektoru. Ako pretvarač ide gotovo sinhrono, mora tamo priključeni voltmetar za istosmjernu struju davati otklone polako u taktu frekvencije klizanja. Ako pak kazaljka instrumenta treperi malim otklonom amo tamo, ukazuje to na gotovo dvostruku uzbudnu frekvenciju. U tom slučaju treba izmijeniti redoslijed faza na strani kliznih koluta zamjenom dviju faza. Ako možemo pretvarač opteretiti, mjerimo još i pad napona kod oduzimanja struje na kolektorskoj strani.

Gubitke u bakru armature ne možemo računati kao $I^2 \cdot R$, jer se struje unutar namota armature superponiraju i djelomično ukidaju. Vrijede slična razmatranja kao kod jednoarmaturnog pretvarača za istosmjernu struju. Praktički možemo računati sa cca polovinom gubitaka, koje bismo dobili po normalnim formulama.

Kompenzirani pretvarač frekvencije. Ovaj ima mirni stator, s utorima, u kojima je smješten kompenzacioni namot za poništavanje polja armature. Mogu biti predviđeni i pomoćni polovi. Položaj četkica određen je s osi kompenzacionog namota. Dok nekompenzirani stroj radi kao pretvarač, kompenzirani stroj predstavlja rotorski pojeni trofazni kolektorski stroj. Bitna je razlika u tome, što napon na kolektorskoj strani U nije više nezavisan o brzini vrtnje. Uz napon na kliznim kolutima U_{kl} iznosi on:

$$U = U_{kl} \cdot (1 - s),$$

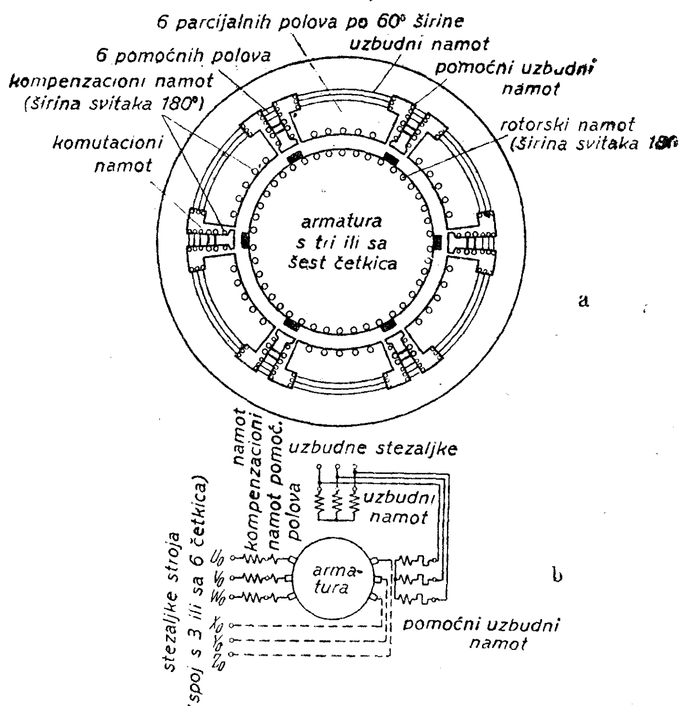
dakle zavisi o klizanju s. Tome je uzrok, što se od konstantnog napona između četkica odbija napon kompenzacionog namota, koji zavisi o klizanju. Daljnja je razlika ta, što preko kliznih koluta teče samo struja magnetiziranja, bez obzira na opterećenje. Transformator ili eventualni izvor napona druge vrste (zakretni transformator) treba dakle dimenzionirati samo za malu snagu magnetiziranja.

Gubici u bakru znatno su veći nego kod nekompenziranog pretvarača, jer uz sadašnje potpune gubitke u namotu armature, imamo još i gotovo jednako velike gubitke u kompenzacionom namotu.

Ispitivanje vršimo kao kod nekompenziranog pretvarača. Nosač četkica udesimo tako, da **napon na stezaljkama kolektorske** strane uzbuđenog stroja pri mirovanju bude minimalan. U radu moramo međutim nosač gdjekada malo zakrenuti **u** smjeru vrtnje, da **bismo** u određenim prilikama spriječili pojave samouzbude. Neutralni i radni položaj nosača označimo.

i) Statorski uzbuđeni trofazni kolektorski stroj

Sastav i način rada. Kod velikih asinhronih strojeva s regulacijom primjenjujemo trofazne kolektorske strojeve da — priključeni na klizne kolute — preuzmu snagu klizanja. Ovi pretvaraju kod podsinhronog rada



Sl 183. Shematski prikaz (a) i shema spoja (b) statorski pojena trofaznog kolektorskog stroja za frekvenciju klizanja (uključivši istosmjernu struju) sa šest parcijalnih polova i šest komutacionih zona za spoj s tri ili sa šest četkica. Nepotpuno okretno polje može rotirati u smjeru ili nasuprot smjeru mehaničke vrtnje. Redoslijed faza četkica odgovara smjeru vrtnje okretnog polja.

prednjeg motora snagu klizanja u mehaničku snagu, koju predaju ili osovini samog asinhronog motora ili pak posebnom stroju. Kod nadsinhrone brzine radi kolektorski stražnji stroj, naprotiv, kao generator, kojemu treba dovoditi mehaničku snagu. Frekvencija struje i napona je frekven-

cija klizanja, koja postaje kod sinhronog rada prednjeg stroja jednaka nuli. U tom slučaju radi stražnji stroj s istosmjernom strujom.

Rjeđe nalazimo samostalni motorski ili generatorski rad statorski uzbuđenog kolektorskog stroja. Ovo posljednje na pr. za pogon asinhronih motora, kojima brzinu vrtnje reguliramo isključivo promjenom uzbudne frekvencije kolektorskog stroja.

Stroj je sastavljen uglavnom jednako kao kompenzirani istosmjerni stroj. Lamelirani stator ima glavne polove s koncentriranim ili porazdijeljenim uzbudnim namotom, pomoćne polove, te kompenzacioni namot, koji je smješten na obodu u pravilno razmještenim utorima. Uzbuda je u većini slučajeva spojena kao nezavisna, rjeđe kao samouzbuda. Čisto serijsku uzbudu praktički ne ćemo naći, no uz poredni namot može biti izveden još dodatni serijski namot. Ovaj u pravilu jača polje kod motorskog, a slabi polje kod generatorskog rada. Pomoćne polove uzbuđuje struja armature jedne ili više faza. Dodatna pomoćna uzbuda ima zadaću, da djelomično poništi napon *transformacije*, koji je kratko spojen u svitku, koji komutira.

Armatura je, općenito, izvedena s tri četkice, no kod izvedbe sa šest parcijalnih polova možemo je opremiti i za šesterofazni rad sa šest četkica.

Snaga se kreće do cca 1,500 kVA uz frekvenciju klizanja od cca 3 do 5 perioda. Kod manjih snaga od nekoliko stotina kVA gradimo strojeve i za veće frekvencije do cca 15 perioda.

Osnovna je razlika stroja sa šest parcijalnih polova i t. zv. Scherbiusovog stroja u sastavu, dok se u načinu rada tek malo razlikuju.

Trofazni kolektorski stroj sa šest parcijalnih polova. Na sl. 183 shematski je prikazan dvopolni stroj.

Raspoznajemo ukupno šest parcijalnih polova, od kojih po dva nasuprot smještena predstavljaju »sjeverni« i »južni« pol jedne faze. Okomito na njih leže oba pripadna pomoćna pola. U utorima nastavka glavnog pola, i sasvim odozdo u susjednim tuđim utorima pomoćnog pola leži kompenzacioni namot. Namot pomoćnih polova smješten je u vlastitim utorima pomoćnog pola. Iznad njega nalazi se pomoćni uzbudni namot ili namot za potiskivanje od tanke žice, koji obuhvata samo komutacioni zub. Ovaj je priključen na uzbudne stezaljke preko velikog otpora, tako da je struja u njemu vremenski pomaknuta u fazi prema uzbudnoj struji za gotovo 90^0. Komutaciono polje proizvedeno od te struje, inducira u svitku, koji komutira napon rotacije. Ovaj treba po mogućnosti da drži ravnotežu naponu transformacije induciranom od pulzirajućeg polja. Napon transformacije zavisi kvadratično o toku, jer je ovaj sam praktički linearno zavisan o frekvenciji. To vrijedi za važan slučaj, kad napon na stezaljkama armature raste linearno s rastućom frekvencijom, dok brzina vrtnje ostaje

potpuno ili bar približno konstantna. Napon rotacije raste linearno s frekvencijom, jer je uzbudni napon, izuzev najbližu okolinu sinhronizma, također proporcionalan s tokom. Za armaturu s jednim zavojem po lameli vrijede ove relacije:

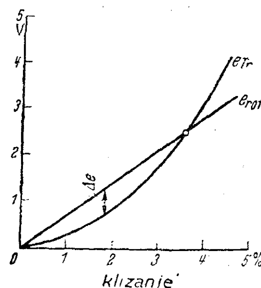
napon transformacije $e_{tr} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot (s \cdot f) \cdot \frac{\Phi}{100}$

$= K_1 \cdot s^2,$ jer je Φ proporcionalno sa s,

napon rotacije $e_{rot} = 2 \cdot l_{\check{z}} \cdot v_a \cdot B_{pom_{uzb}} \cdot 10^{-6}$

$= K_2 \cdot s,$ jer je $B_{pom_{uzb}}$ proporcionalno sa s.

Φ je tok u megamaksvelima na 180°el opsega, s klizanje, f uzbudna frekvencija, $l_{\check{z}}$ duljina željeza u cm, v_a obodna brzina armature u m/sek, te $B_{pom_{uzb}}$ indukcija ispod pomoćnog pola, koja nastaje djelovanjem pomoćnog uzbudnog namota. Na sl. 184 vidimo, da poništavanje napona transformacije uspijeva samo kod jednog određenog klizanja, dok kod ostalih vrijednosti preostaju mali naponi. Ovi opterećuju četkice i izazivaju struje kratkog spoja ispod njih, no te ostaju u podnošljivim granicama.



Sl. 184. Napon transformacije i napon rotacije, proizveden pomoćnim uzbudnim namotom u zavisnosti o klizanju. Najveći preostatak napona iznosi cca 1/8 najvećeg napona transformacije.

Napon reaktancije svitka, koji komutira, poništavamo, kao i kod istosmjernog stroja ili željezničkog motora, komutacionim poljem. Ovo polje nastaje djelovanjem pravog namota pomoćnih polova, kroz koji teče struja armature. Za razliku od Scherbiusovog stroja, svaki pomoćni pol uzbuđuje samo struja jedne jedine faze.

Poredni uzbudni namot leži u velikim utorima pomoćnog pola zajedno s eventualnim predviđenim kompaundnim namotom. Magnetska sprega među njima u većini slučajeva ne smeta, no možemo je posebnim mjerama i izbjeći.

Kao što je crtkano označeno, postavljanjem dvostrukog broja četkica iz spoja s tri četkice dobivamo spoj sa šest četkica.

Ispitivanje počinje *mjerenjem otpora*. Na namotima, kroz koje teče struja armature, možemo izvesti samo zajedničko mjerenje, jer ove zbog jednostavnijeg spajanja vežemo nerazdvojivo. U uzbudnom krugu treba rastaviti poredni namot i pomoćni uzbudni namot. Otpor armature mjerimo na punom koraku i između dvije lamele. Ali ako stroj ima spojnice s otporom, ne smijemo mjeriti na kolektoru, nego jedino na glavi namota, koju smo očistili od izolacije.

Nakon toga udesimo *nosač četkica*, pošto smo magnetskom iglom unaprijed kontrolirali ispravan redoslijed polova na statoru, priključivši pojedine faze na istosmjernu struju. Uzbudni namot priključimo trofazno

na napon frekvencije klizanja, te mjerimo napon na stezaljkama kruga armature. Stroj miruje, a u namotu armature i u kompenzacionom namotu induciraju se gotovo jednako veliki naponi, ali suprotnog smjera. Nosač četkica je u pravom položaju onda, kad je napon na stezaljkama kruga armature minimalan. No možemo primijeniti i induktivnu metodu kao kod istosmjernog stroja. Položaj četkica označimo prvo provizorno, a konačno ćemo ga označiti tek nakon pokusa opterećenja. Točan položaj osobito je važan, jer su AZ armature znatno veći od uzbudnih AZ, pa stoga i najmanji pomak nosača vrlo jako utječe na tok. Dobro je nakon toga izmjeriti i korak četkica, pri čemu treba odstraniti odstupanja veća od 0,5 mm.

Pokusi praznog hoda. Pomoćnim motorom potjeramo stroj nominalnom brzinom vrtnje, uzbudimo ga i odredimo kod konstantne uzbudne frekvencije krivulju zasićenja, snagu za pogon i uzbudnu snagu. Redoslijed faza u uzbudnom krugu ne utječe na veličinu napona. Jedino na samim četkicama možemo ustanoviti, da li uzbudno polje rotira u smjeru ili nasuprot smjeru vrtnje. U prvom slučaju je napon na četkicama manji od napona na stezaljkama, u drugom slučaju veći.

Pokusi opterećenja. Ako nam stoji na raspolaganju prednji stroj, da provedemo zajedničko ispitivanje, najbolje je izvoditi opterećenje s pomoću ovoga, u pravom spoju. U protivnom slučaju služe kao opterećenje otpornici, gdjekada zajedno s velikim asinhronim strojevima. Stroj možemo ispitivati i istosmjernom strujom, ako ga uzbudimo istosmjernom strujom, i to tako da priključimo samo U i V uzbudnog namota. Pri tome ne treba zaboraviti, da istosmjernu struju treba uzeti $\sqrt{1,5} = 1,23$ puta veću od ekvivalentne izmjenične struje. Umjesto 100 A izmjenične struje, treba dakle uzeti 123 A istosmjerne struje.

Snimanjem karakteristike napona na stezaljkama uz konstantnu uzbudu kod pokusa opterećenja provjeravamo ispravan priključak kompaundnog namota. Kod strojeva bez kompaundnog namota jednake karakteristike napona za lijevi i desni smjer vrtnje pokazuju ispravan neutralni položaj četkica.

Komutacija. Kod rada s istosmjernom strujom odvojimo pomoćni uzbudni namot te ispitujemo komutaciju kao kod istosmjernog stroja. Snimimo dakle napon četkice, kroz koju teče struja i promijenimo, ako je to potrebno, stupanj kompenzacije dodavanjem ili oduzimanjem polovine ili čitavog jednog zavoja u namotu pomoćnog pola. Zbog malog broja perioda možemo predvidjeti i nastavke na pomoćnim polovima, koji omogućuju promjenu raspora ispod pomoćnih polova.

Pomoćni uzbudni namot udešavamo u praznom hodu kod uzbudne frekvencije, koja leži tik ispod najviše radne frekvencije. Predot-

por mijenjamo tako dugo, dok ne nestane pucketavo iskrenje pod četkicama, izazvano naponom transformacije. Treba paziti na ispravan priključak pomoćnog uzbudnog namota. Njegovo polje mora prostorno i vremenski zaostajati za 90^0 iza polja pripadnog glavnog uzbudnog namota. Struja u pomoćnom uzbudnom namotu prethodi u fazi za gotovo 90^0 uzbudnoj struji, zato treba početak i svršetak pomoćnog uzbudnog namota zamijeniti prema priključku uzbudnog namota. Gdjekada je to potrebno provjeriti.

Pokus kratkog spoja. Ovaj je pokus važan, jer iz njega možemo vidjeti sklonost stroja, da se sam uzbudi. Četkice kratko spojimo i stroj uzbudimo. Struja kratkog spoja ne smije nipošto sama rasti, već mora svakoj vrijednosti uzbudne struje pripadati točno određena vrijednost struje kratkog spoja. Osobito struja, koja teče kod neuzbuđenog stroja zbog remanencije, ne smije biti veća od 5 do 10% nominalne struje. Ako je to potrebno, osigurat ćemo potrebnu stabilnost malim pomakom četkica prema naprijed. Time ćemo doduše gdjekada pogoršati komutaciju, jer svici, koji komutiraju mogu izići iz komutacionog područja.

Scherbiusov stroj. Sastav: Scherbiusov stroj razlikuje se od prethodnog stroja slijedećim bitnim oznakama: Armatura ima namot istosmjerne struje sa svicima širine ne 180^0, već samo 120^0. Skraćenje od 60^0 uzrokuje, da umjesto šest komutacionih zona dobivamo samo tri. Stoga trebamo samo tri pomoćna pola na svakih 360^0 el. Između ovih leže parcijalni polovi, od kojih na svaku fazu otpada samo po jedan. Imamo dakle samo »sjeverni pol«, dok »južnog pola« nema, a magnetski tok se zatvara kroz oba pola drugih faza. Tri parcijalna pola sačinjavaju t. zv. slog polova.

Parcijalni polovi uzbuđuju se strujom frekvencije klizanja, pri čemu možemo prikladnim preklapanjem postići fazni položaj između uzbudnog napona i napona na stezaljkama, koji želimo. Inače može uzbudni krug isto tako biti spojen paralelno, kompaundno, serijski i nezavisno.

Kompenzacioni namot služi za potpuno poništavanje polja armature. U tu svrhu je potrebno, za razliku od stroja sa šest parcijalnih polova, da pojedine kompenzacione utore protječu struje svih triju faza.

Pomoćni pol ima tri namota. Dva su pojena strujama različitih faza, dok treći opet predstavlja pomoćni uzbudni namot. Podjelom pomoćnog pola u aksijalnom smjeru možemo izbjeći spregu obiju grupa svitaka.

Spoj sa šest četkica kod Scherbiusovog stroja, kao što je prirodno, nije izvediv.

Ispitivanje izvodimo prema istim gledištima kao kod prethodno opisana stroja. Ispravan spoj namota, koji su znatno kompliciranije smješteni, najbolje je kontrolirati prije ugradnje armature.

III. DIO

MJERNI INSTRUMENTI I METODE MJERENJA

A. MJERENJE ELEKTRIČKIH VELIČINA

a) Općenito

Električke veličine mjerimo u ispitnim stanicama pretežno indirektnom metodom. Mjerni instrumenti imaju jedno jedino područje mjerenja, koje proširujemo za vrlo široka područja, koja su nam potrebna, a to činimo porednim otpornicima i predotpornicima ili strujnim i naponskim mjernim transformatorima. Neki ampermetri i vatmetri izvedeni su doduše s preklopnim uređajem za djelomične vrijednosti struje, a predotpornici u voltmetrima i vatmetrima često su neposredno prigrađeni u kućištu.

Mjerne instrumente očitavamo u dijelovima skale, a ne neposredno u voltima, amperima ili vatima. Ispitni zapisnici imaju zato uvijek dvije kolone. U prvu unosimo očitanje u dijelovima skale, a u drugu iznos u voltima, amperima ili vatima, koji smo dobili računski množenjem s mjernom konstantom C. Mjernu konstantu označimo iznad druge kolone, a izračunavamo je kao što je to dalje navedeno. Preporučuje se iz iskustva da se napiše proračun konstanata sa svim brojkama, jer na taj način možemo pogrešku, koju smo eventualno učinili kod njihova određivanja, naknadno lakše pronaći i ukloniti.

Izbor mjernih instrumenata prema njihovoj točnosti mjerenja, određen je točnošću, koju zahtijevamo kod ispitivanja stroja. Za uobičajeno ispitivanje zadovoljavaju jeftiniji i robusniji instrumenti s pogreškom pokazivanja od 1,5%, koji odgovaraju prijašnjoj oznaci G. Za ispitivanje kod preuzimanja i za važna mjerenja u ispitnoj stanici upotrebljavamo pak točnije instrumente s pogreškom od 0,2 do 0,5%, koji po točnosti odgovaraju prijašnjoj klasi E, odnosno F.

Instrumente treba postaviti u položaj, koji je na njima označen, i to tako, da po mogućnosti budu isključeni svi vanjski utjecaji, koji mogu smetati. Osobito treba paziti, da ih ne postavimo u neposrednu blizinu vodiča, kroz koje teče struja ili čak tako, da ovi predstavljaju zavoj oko stola s instrumentima. Isto tako treba izbjegavati postavljanje na kućišta otpornika ili na druga tijela, koja se ugrijavaju, a također se treba pobrinuti, da se ne prenosi trešnja od susjednih strojeva. Međusobni razmak instrumenata treba da iznosi najmanje **30 cm.**

Kontrolu instrumenata s pomoću drugih, preciznih instrumenata ili kompenzatora vršimo u redovitim vremenskim razmacima; to isto vrijedi i za predotpornike i poredne otpornike. Osobito su ovi posljednji vrlo izlo-

ženi mehaničkim oštećenjima, zbog svoje većinom otvorene izvedbe. Strujne i naponske transformatore možemo kontrolirati u većim vremenskim razmacima. Strujni transformatori, koji su zabunom bili sekundarno otvoreni, dok je primarno tekla struja, mogu primjetljivo griješiti zbog remanentnog magnetizma. Treba ih odvojiti iz mjernog rasporeda, te ih prije daljnje upotrebe razmagnetizirati i kontrolirati.

Prije početka mjerenja kontroliramo nul-položaj kazaljke instrumenta, te ga prema potrebi udesimo vijkom za udešavanje.

U daljnjim odsjecima b-c i pripadnim slikama 186—206 znači:

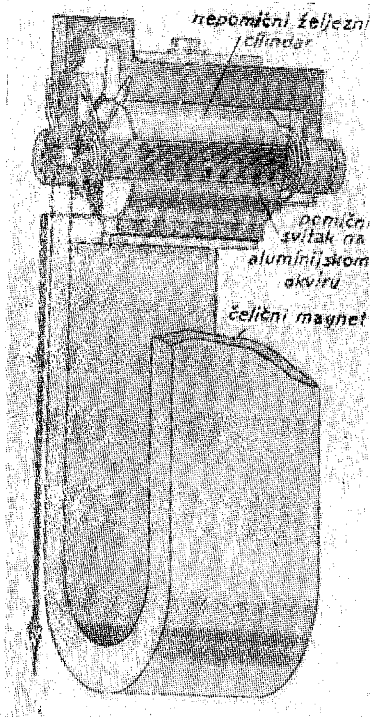
α = otklon mjernog instrumenta u dijelovima skale,
α_{uk} = ukupni broj svih dijelova skale,
C = mjerna konstanta u V, A, W, VA po dijelu skale,
u_i = nominalni napon, odnosno nominalni pad napona u instrumentu u V,
i_i = nominalna struja instrumenta u A,
U_p = nominalni pad napona na porednom otporniku u V,
I_p = nominalna struja porednog otpornika u A,
U_{pr}/U_{sek} = primarni/sekundarni nominalni napon naponskog transformatora,
I_{pr}/I_{sek} = primarna/sekundarna nominalna struja strujnog transformatora.

b) Mjerenje struje, napona i snage kod istosmjerne struje

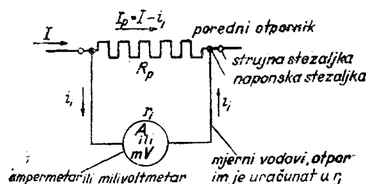
Za **mjerenja struje** upotrebljavamo u ispitnoj stanici gotovo isključivo *instrumente sa zakretnim svitkom* i permanentnim magnetom. Na sl. 185 vidi se, kako je sastavljen mjerni sistem. U prstenastom rasporu, između cilindrički tokarenih polnih nastavaka magneta i koncentrično prema njima smještena mirnog željeznog cilindra, može se zakretati svitak, kroz koji teče struja, nasuprot sili dvaju spiralnih pera, koja ujedno služe za dovod struje. Kut zakreta α mjera je za jakost struje. S pomoću kazaljke prenosimo ga na skalu, koja je podijeljena većinom na 100 ili 150 jednakih dijelova.

Instrument za mjerenje struje ima skalu podijeljenu na milivolte. Uobičajeni su instrumenti s krajnjom vrijednosti od 60, 100, 150 ili 300 mV. Ovi uzimaju tek nekoliko miliampera struje, te ih upotrebljavamo, prema sl. 186, uvijek zajedno s porednim otpornikom. Zbog svojeg znatno manjeg otpora uzima ovaj gotovo punu struju, dok milivoltmetar mjeri pad napona na njegovim stezaljkama. Poredni otpornici označeni su nominalnom strujom i padom napona, na pr. 75 A i 650 mV. Možemo ih upotrebljavati u vezi s milivoltmetrima različita vlastitog otpora, ako im vlastiti potrošak struje ne prelazi 0,1% mjerene struje. Kod mjerenja malih

struja smijemo milivoltmetar upotrebljavati jedino s njegovim pripadnim porednim otpornikom. Osim toga ne treba zaboraviti, da mjerni vodovi do instrumenta, koji ga spajaju s priključcima za napon porednog otpornika, treba da budu odmjereni zajedno s instrumentom, te ih ne smijemo nadomjestiti provizornim spojevima žicom. Bezuvjetno treba izbjegavati dovode iz različitih materijala, jer u protivnom slučaju može doći do grubih pogrešaka kod mjerenja, zbog termosilâ, koje nastaju.



Sl. 185. Sastav instrumenta sa zakretnim svitkom



Sl. 186. Mjerenje istosmjerne struje s porednim otpornikom. **Kod upotrebe izrazitog ampermetra — što je rijedak slučaj — prolazi znatan dio mjerene struje kroz instrument, ostatak kroz poredni otpornik. Kod uobičajene primjene milivoltmetra prolazi praktički čitava struja kroz poredni otpornik. Instrument zapravo mjeri pad napona, koji nastaje zbog struje.**

a) Mjerna konstanta: $C = \frac{i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \left(1 + \frac{r_i}{R_p}\right) = \frac{I_n}{\alpha_{uk}}$

gdje je: i_i = nominalna struja instrumenta,
I_n = nominalna struja zajedno s porednim otpornikom.

b) Vrijednost porednog otpora R_p, koji je potreban za mjerenje nominalne struje I_n kod punog otklona, izračunavamo:

$R_p = \frac{r_i}{\frac{I_n}{i_i} - 1}$ kod upotrebe izrazitog ampermetra za nominalnu struju i_i s otporom r_i;

$R_p = \frac{u_i}{I_n - i_i} \approx \frac{u_i}{I_n}$ kod upotrebe milivoltmetra, s nominalnim padom napona u_i i nominalnom strujom $i_i = u_i / r_i$.

c) Kod upotrebe milivoltmetra za 150 mV uz 5 **oma** otpora prolaze kroz poredni otpornik, odnosno **kroz** instrument slijedeće procentualne struje:

I_n	1,5	3,0	7,5	15	30	75	150	300	750	1500	A
I_{por} %	98,0	99,0	99,6	99,8	99,9	99,96	99,98	99,99	99,996	99,998	%
I_{instr} %	2	1	0,4	0,2	0,1	0,04	0,02	0,01	0,004	0,002	%

U novije vrijeme označena je na porednim otpornicima i struja, koju uzima pripadni instrument, a koja je uzeta u obzir kod baždarenja, ako ova premašuje 0,1% nominalne struje.

Mjernu konstantu milivoltmetra, spojenog s porednim otpornikom izračunavamo:

$$\text{mjerna konstanta } C = \frac{\textbf{nominalna struja porednog otpornika}}{\textbf{ukupni broj dijelova skale}}.$$

Primjer: milivoltmetar sa 150 dijelova skale za 60 mV, poredni otpornik za 75 A i također 60 mV

$$C = \frac{75}{150} = 0{,}5 \text{ A po dijelu skale.}$$

Ako se smjer struje mijenja, često je potrebno prespajati milivoltmetar za vrijeme mjerenja, pri čemu postoji opasnost da dodirnemo vodove pod naponom. Zbog vrlo malog vlastitog otpora može instrument kod toga eksplodirati. U praksi je zato uobičajeno zaštititi instrument i onoga, koji očitava, ugradnjom osigurača. Njegov dodatni otpor treba kod baždarenja također uzeti u obzir. Dodatnu temperaturnu pogrešku, koja nastaje, možemo obično zanemariti.

Premašuju li za vrijeme ispitivanja struje u kratkom vremenu nominalnu struju upotrebljavana porednog otpornika, možemo ipak očitati mjerenu vrijednost, ako spojimo dva jednaka milivoltmetra u seriju. Otklone obaju instrumenata zbrojimo, mjerna konstanta ostaje ista. Mijenja li se struja tokom ispitivanja u širokim granicama, možemo dva ili više različitih porednih otpornika spojiti u seriju. Milivoltmetar prespajamo svaki put od jednog otpornika na drugi. Poredne otpornike s manjom nominalnom strujom premostimo jednopolnom sklopkom, čim struja postane prevelika.

Kako je kod milivoltmetra uvijek točno označen polaritet stezaljki, možemo njime odrediti smjer struje. Kod ispravna otklona instrumenta teče struja od (+)-stezaljke prema (—)-stezaljki.

Gdjekada je potrebno izvršiti mjerenje, ma da nemamo poredne otpornike, koji spadaju k instrumentu, no možemo pribaviti druge. Za najopćenitiji slučaj, da poredni otpornik, kojim raspolažemo, ima drugi nominalni pad napona U_p, no što ga ima instrument, te da je kod njegova baždarenja uzeta u obzir druga struja instrumenta i', računamo točnu mjernu konstantu:

$$C = \frac{I_p}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{u_i}{U_p} + \frac{i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \left(1 - \frac{i_i'}{i_i} \cdot \frac{u_i}{U_p}\right).$$

Obično su takva mjerenja potrebna samo kod većih struja, iznad 10 A. U tom slučaju možemo vrlo približno uzeti:

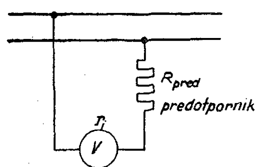
$$C \approx \frac{I_p}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{u_i}{U_p}.$$

Mjerenje istosmjernog napona. Za mjerenje istosmjernog napona upotrebljavamo instrument sa zakretnim svitkom uz prikladne predotpornike. Obično su ovi ugrađeni u instrument i spojeni s više stezaljki na ku-

ćištu; ove su označene u voltima prema mjernom području. Mjerna konstanta C određena je sa:

$$C = \frac{\text{napon označen na stezaljci, koju upotrebljavamo u voltima}}{\text{ukupni broj svih dijelova skale}} = \frac{u_i}{\alpha_{uk}}.$$

Kao drugu stezaljku upotrebljavamo nul-stezaljku označenu sa 0. Kod upotrebe zasebnih vanjskih predotpornika treba spojiti instrument s posebno označenom stezaljkom predotpornika. Gdjekada treba spojiti i nul-



a) Mjerna konstanta: $C = \frac{u_i}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{R_{pred} + r_i}{r_i}$, gdje je u_i nominalni napon voltmetra.

b) Vrijednost predotpora, koji je potreban za mjerenje napona U pri punom otklonu jednaka je:

$$R_{pred} = \left(\frac{U}{u_i} - 1\right) \cdot r_i$$

Sl. 187. Mjerenje napona kod istosmjerne i izmjenične struje s predotpornikom.

stezaljku. Mjernu konstantu izračunavamo, kako je već prije rečeno. Općenito se vrijednost mjerne konstante C_{instr} instrumenta s vlastitim otporom r_{instr} kod upotrebe predotpora R_{pred}, prema sl. 187, povećava na:

$$C_{pred} = C_{instr} \cdot \frac{r_{instr} + R_{pred}}{r_{instr}}.$$

Obično upotrebljavamo instrumente s predotpornikom do 600 V. Za rjeđa mjerenja iznad te vrijednosti spojimo dva jednaka instrumenta s predotpornicima u seriju. Očitanja obaju instrumenata zbrajamo. Treba se pobrinuti, da instrumenti budu postavljeni izolirano.

Mjerenje snage kod istosmjerne struje. Snagu kod istosmjerne struje ne određujemo vatmetrom, već je izračunavamo kao produkt struje i napona. Jedino baždarenje vatmetara izvodimo istosmjernom strujom.

c) Mjerenje struje, napona i snage kod izmjenične struje tehničke frekvencije (15—100 Hz)

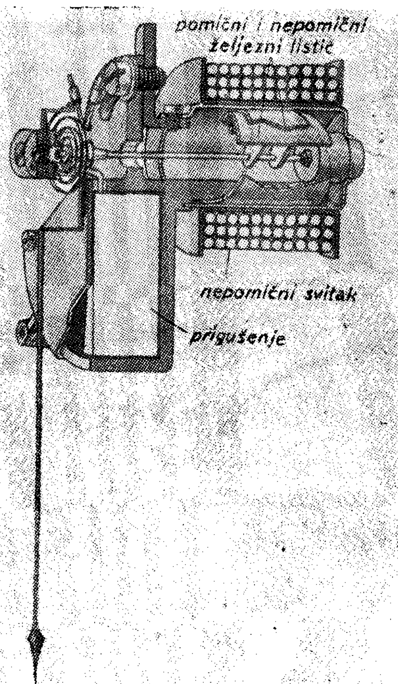
Mjerenje struje. Kao instrument za mjerenje upotrebljavamo danas pretežno *instrument s pomičnim željezom*. Njegov sastav vidi se na sl. 188. Mjerena struja teče kroz nepomični svitak, u kojemu je smješten jedan nepomični i jedan pomični željezni listić. Oba listića se međusobno odbijaju zbog istog polariteta, kojim su magnetizirani. Protusilu daje pero, no ovo ne služi za dovod struje kao kod instrumenta sa zakretnim svitkom. Prikladnim legiranjem i izborom oblika dobivamo skalu, koja je, počevši od 10—20% konačne vrijednosti dalje, podijeljena približno jednoliko.

Instrumenti druge izvedbe imaju jedan jedini pomični listić, koji ulazi u svitak, kroz koji teče struja.

Direktna mjerenja praktički tek rijetko izvodimo. Gotovo uvijek upotrebljavamo *strujni transformator*, koji je namotan sekundarno za 5 A, a primarno za veličinu izmjenične struje, koju treba mjeriti (sl. 189). Uobičajene su primarne nominalne struje od 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 i t. d. A. Mjernu konstantu ampermetra za izmjeničnu struju sa strujnim transformatorom izračunavamo:

$$C = \frac{\text{nominalna struja instrumenta}}{\text{ukupni broj dijelova skale}} \cdot \frac{\text{primarna nominalna struja mjernog transformatora}}{\text{sekundarna nominalna struja mjernog transformatora}}.$$

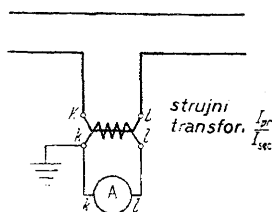
Kod nekih mjernih transformatora možemo mijenjati primarno nominalnu struju prespajanjem primarnog namota. Vrlo su praktični, osobito kod mjerenja izvan ispitne stanice, strujni transformatori s otvorom, kako se vidi na sl. 190. U prikazanoj izvedbi ima takav mjerni transformator tri primarne stezaljke za struje od 15 i 50 A. Sekundarno teče 5 A. Za veće struje ne upotrebljavamo više postojeći primarni namot, već više puta ili samo jedamput provučemo kroz otvor mjernog transformatora vodič u primarnom strujnom krugu. Provučemo ga: 6 puta za 100 A, 4 puta za 150 A, 3 puta za 200 A, 2 puta za 300 A i 1 put za 600 A. Kao primarne zavoje brojimo samo vodiče, koji prolaze kroz otvor. Mjerni transformator priključujemo tako, da primarnu stezaljku *K* spojimo s vodom, koji dolazi od proizvođača (centrale), a stezaljku *L* s vodom, koji vodi do potrošača, odnosno kod upotrebe transformatora s otvorom priključimo ga tako, da strana označena sa *K* bude okrenuta prema proizvođaču, a strana označena sa *L* prema potrošaču. Sekundarne stezaljke *k* i *l* spojimo na jednako označene stezaljke ampermetra. Kod obrnuta priključka ne mijenja se otklon instrumenata. No kako većinom priključujemo i vatmetar, kod kojega smjer otklona zavisi o ispravnom priključku stezaljki, ravnamo se i kod ampermetra prema navedenim oznakama.



Sl. 188. Sastav instrumenta s pomičnim željezom

Strujni transformator radi u kratkom spoju. Napon, koji se pojavljuje primarno i sekundarno na njegovim stezaljkama, vrlo je malen. Ako ga

međutim u pogonu zabunom sekundarno otvorimo, magnetizirat će primarni amperzavoji u punoj svojoj veličini, jer im sekundarno ne djeluju



Mjerna konstanta:

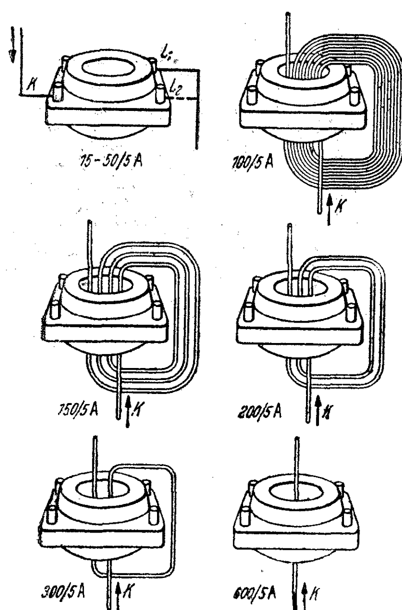
$$C = \frac{i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{I_{pr}}{I_{sek}}$$

i_i = nominalna struja instrumenta (uzevši u obzir spoj strujnih svitaka)).

$$\frac{I_{pr}}{I_{sek}} = \frac{\text{primarna nominalna struja strujnog transformatora}}{\text{sekundarna nominalna struja strujnog transformatora}}$$

Sl. 189. Mjerenje izmjenične struje sa strujnim transformatorom

nasuprot nikakvi amperzavoji. Posljedica je toga, da će se željezna jezgra magnetizirati do zasićenja, te će na primarnoj strani nastati veliki pad napona. Kako je sekundarni broj zavoja mnogostruko veći od primarnoga, bit će napon na sekundarnim stezaljkama još znatno veći, te može ugroziti rukovaoca. Osim toga nastaju veliki štetni gubici u željezu, a nakon isklapanja gdjekada ostaje u transformatoru remanentni magnetizam, koji jako utječe na njegovu točnost. Svaki strujni transformator moramo zato, ukoliko nije opterećen instrumentima, kratko spojiti. Taj kratki spoj možemo izvesti na primarnoj ili na sekundarnoj strani.



Sl. 190. Strujni transformator s otvorom
Spojevi za različite prijenosne omjere.
15/5 A primarni priključak na K i L_1.
50/5 A primarni priključak na K i L_2.
100/5 A primarni vodič 6 puta provući
150/5 A primarni vodič 4 puta provući
200/5 A primarni vodič 3 puta provući
300/5 A primarni vodič 2 puta provući
600/5 A primarni vodič 1 puta provući

Kod mjerenja u mrežama visokog napona jednu stezaljku mjernog transformatora na sekundarnoj strani uzemljimo. Instrumente, koji su priključeni na isti strujni transformator, treba spojiti u s e r i j u, tako da kroz njih prolazi ista struja. Ukupni njihov potrošak ne smije prekoračiti vrijednost dopuštena opterećenja mjernog transformatora u VA.

Mjerenje izmjeničnog napona. Izmjenični napon mjerimo također pretežno instrumentom s pokretnim željezom. Svitak ima mnogo zavoja tanke žice. Predotpornici omogućuju, kao kod instrumenta sa zakretnim svitkom, mjerenje svih napona do 600 V. Mjernu konstantu izračunavamo na isti

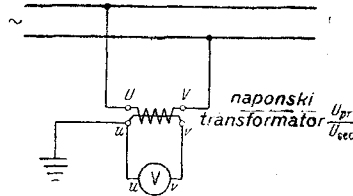
način, kao kod instrumenta sa zakretnim svitkom. Kod većih napona upotrebljavamo gotovo isključivo naponske transformatore, koji omogućuju mjerenja do najvećih napona. Sekundarni napon mjernih transformatora bio je prije 110 V, danas je većinom 100 i 110 V, t. j. na istom mjernom transformatoru nalaze se priključci za oba napona. Spoj s mjernim transformatorom prikazuje sl. 191. Mjernu konstantu računamo:

$$C = \frac{\text{nominalni napon instrumenta}}{\text{ukupni broj dijelova skale}} \cdot \frac{\text{primarni nominalni napon mjernog transformatora}}{\text{sekundarni nominalni napon mjernog transformatora}}$$

Pod nominalnim naponom instrumenta razumijevamo onaj, koji dobivamo uzevši u obzir predotpornik, koji je eventualno upotrebljen.

Mjerna konstanta: $C = \frac{u_i}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sek}}$

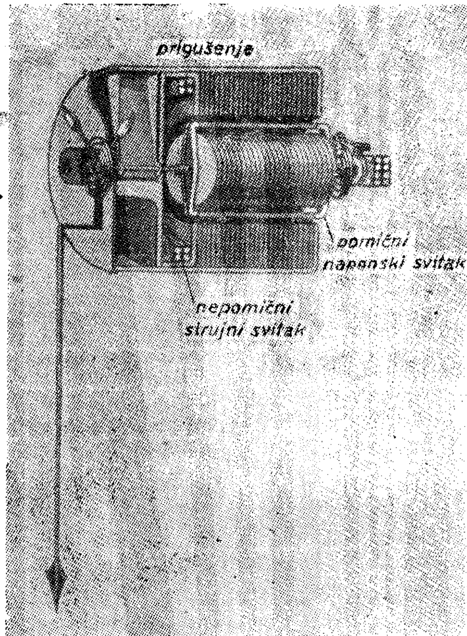
U_{pr} = primarni nominalni napon } mjernog
U_{sek} = sekundarni nominalni napon } transformatora
u_i = nominalni napon voltmetra uzevši u obzir eventualni upotrebljeni predotpornik.



Sl. 191. Mjerenje napona kod izmjenične struje s naponskim transformatorom

Stezaljke naponskog transformatora označene su primarno *UV*, a sekundarno *uv*. Oba namota motana su u istom smislu. Sekundarne stezaljke spojimo s jednako označenim stezaljkama voltmetra. Ako zamijenimo priključak, otklon se ne će promijeniti. Kao i kod strujnog transformatora, ispravan priključak je važan jedino kod vatmetra. Više instrumenata priključujemo na jedan naponski transformator *paralelno*. Ukupni njihov potrošak ne smije prekoračiti dopušteno opterećenje u VA.

Mjerenje snage kod izmjenične struje. Kao vatmetar upotrebljavamo *elektrodinamski instrument*, kod kojega u jednom svitku teče struja, a u drugom svitku, koji se može zakretati unutar prvoga, teče struja proporcionalna s naponom i s njim u fazi. Na pomični svitak djeluje zakretni moment,



Sl. 192. Sastav elektrodinamskog instrumenta (vatmetra) sa željeznim magnetskim krugom

te ga nastoji postaviti u istu os s nepomičnim svitkom, čemu se protivi protusila pera, koja ujedno služe za dovod struje. Unutarnji sastav prikazuje sl. 192. Kod istosmjerne struje otklon zavisi o produktu napona i struje, kod izmjenične struje o produktu napona, struje i faktora snage. U oba slučaja mjerimo dakle djelatnu snagu. Kod izmjenične struje može faktor snage biti vrlo malen ili čak nula. U posljednjem slučaju ne daje instrument otklon, pa ni u slučaju, kad mu privodimo puni napon i punu struju. Dok kod instrumenata za mjerenje struje i napona možemo kod manjeg otklona uvijek odabrati slijedeći manji opseg mjerenja, da bismo dobili što veći otklon, kod vatmetra to nipošto nije slučaj. Zato treba uvijek kontrolirati struju ampermetrom, a napon voltmetrom, te jedino prema ovim očitanjima priključivati odgovarajući mjerni opseg za struju i za napon vatmetra. Jedino specijalni instrumenti za mjerenje snage kod vrlo malog faktora snage daju puni otklon uz $\cos\varphi = 0{,}1$ ili 0,3. Napon i struja ne smiju međutim ni kod ovih instrumenata prekoračiti naznačene maksimalne vrijednosti.

Strujni svitak vatmetra predviđen je obično za 5 A, gdjekada se može prespojiti za 2,5 A. Nominalni napon samog instrumenta je gotovo uvijek 30 V uz otpor naponske grane od 1000 Ω. Predotpornici po 1000 Ω za svakih daljnjih 30 V omogućuju mjerenja do 600 V. Iznad toga upotrebljavamo naponske transformatore. Strujnu granu gotovo nikada ne priključujemo direktno u strujni krug, nego preko strujnog transformatora. Mjernu konstantu normalnog instrumenta s punim otklonom kod $\cos\varphi = 1{,}0$ izračunavamo:

$$C_{instr} = \frac{\text{nominalni napon instrumenta} \cdot \text{nominalna struja instrumenta}}{\text{ukupni broj dijelova skale}}.$$

Pod nominalnim naponom i nominalnom strujom razumijevamo vrijednosti, koje odgovaraju upotrebljenoj naponskoj stezaljci i spoju strujnih svitaka (u seriju ili paralelno). Kod upotrebe strujnih i naponskih transformatora određujemo mjernu konstantu:

$$C = \frac{\text{nominalni napon instrumenta} \cdot \text{nominalna struja instrumenta}}{\text{ukupni broj dijelova skale}} \cdot$$

$$\cdot \frac{\text{primarna nominalna struja strujnog transformatora}}{\text{sekundarna nominalna struja strujnog transformatora}} \cdot$$

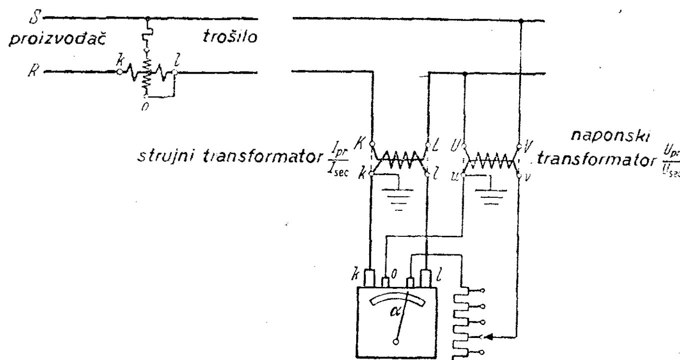
$$\cdot \frac{\text{primarni nominalni napon naponskog transformatora}}{\text{sekundarni nominalni napon naponskog transformatora}}.$$

Kod upotrebe instrumenta za 150 V i 2,5 A sa 150 dijelova skale, strujnog transformatora za 200/5 A i naponskog transformatora za 6000/110 V bit će dakle konstanta:

$$C = \frac{150 \cdot 2{,}5}{150} \cdot \frac{200}{5} \cdot \frac{6000}{110} = 5470 \text{ W po dijelu skale}$$

Vatmetri služe za mjerenje djelatne i jalove snage u jednofaznim i višefaznim mrežama, pri čemu možemo prema postojećim uvjetima upotrebiti jedan od dalje opisanih spojeva.

Mjerenje djelatne snage kod jednofazne struje. Kod mjerenja snage u jednofaznim mrežama spojimo vatmetar, kako se vidi na sl. 193. Otklon instrumenta je pozitivan, kad energija teče u smjeru od *K* prema *L*. Ako



Vatmetar: nominalni napon u_i odgovara upotrebljenoj naponskoj stezaljci; nominalna struja i_i odgovara serijskom ili paralelnom spoju strujnih svitaka.

Mjerna konstanta:

bez mjernih transformatora $C = \frac{u_i \cdot i_i}{\alpha_{uk}}$

samo sa strujnim transformatorom $C = \frac{u_i \cdot i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{I_{pr}}{I_{sek}}$

samo s naponskim transformatorom $C = \frac{u_i \cdot i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sek}}$

sa strujnim i naponskim transformatorom $C = \frac{u_i \cdot i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{I_{pr}}{I_{sek}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sek}}$

snaga $N = C \cdot \alpha$ u vatima

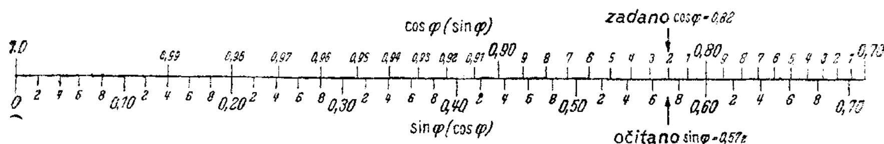
Sl. 193. Mjerenje snage kod jednofazne struje. (Lijevo shema, desno spoj mjernih transformatora i instrumenata. Crtkani spojevi vrijede, kad se dotični mjerni transformator ne upotrebljava. Uzemljenje tada otpada. Ista napomena vrijedi i kod daljnjih slika).

se kazaljka kod obrnutog toka energije otkloni u suprotnom smjeru, prespojimo naponsku granu s pomoću ugrađene preklopke. Isto tako djeluje zamjena priključaka strujne grane, no to možemo izvesti jedino ako se strujni transformator može kratko spojiti.

Mjerenje jalove snage kod jednofazne struje. Možemo je mjeriti instrumentom, kod kojega je posebnim spojem naponske grane struja u ovoj zakrenuta za 90° prema priključenom naponu. Zbog upotrebe u seriju spojenih prigušnica, pokazivanje ovakva instrumenta zavisi o frekvenciji. Kod praktičkog ispitivanja strojeva gotovo nikada ga ne upotrebljа-

vamo. Jalovu snagu određujemo računski iz produkta napona, struje i sin φ. Ovaj posljednji dobivamo iz cos φ kao $\sin\varphi = \sqrt{1 - \cos^2\varphi}$, ili ga očitamo sa skale sin φ = f (cos φ) (sl. 194).

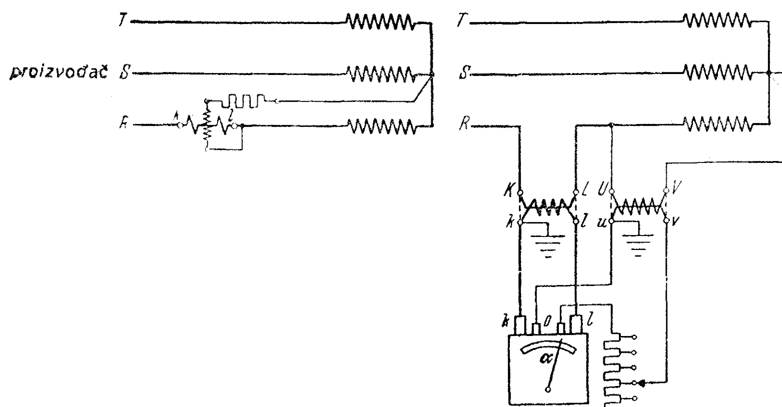
Mjerenje djelatne snage kod trofazne struje s jednako opterećenim fazama i pristupačnom nultočkom. Kod ovog mjerenja potreban je samo



Sl. 194. sin φ = f (cos φ) i obrnuto. (Primjer cos φ = 0,82 ; sin φ = 0,572).

jedan instrument. Ukupna snaga u sve tri faze jednaka je trostrukoj snazi, koju pokazuje instrument. Spoj i određivanje mjerne konstante prema sl. 195.

Mjerenje djelatne snage kod trofazne struje s jednako opterećenim fazama s pomoću umjetne nultočke. U spoju prema sl. 196 načinimo



Mjerna konstanta:

bez mjernih transformatora $C = \dfrac{u_i \cdot i_i}{\alpha_{uk}}$

samo sa strujnim transformatorom $C = \dfrac{u_i \cdot i}{\alpha_{uk}} \cdot \dfrac{I_{pr}}{I_{sek}}$

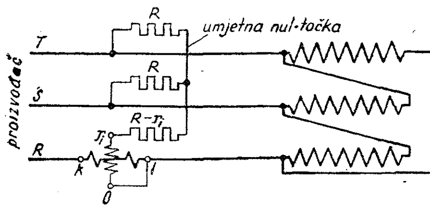
samo s naponskim transformatorom $C = \dfrac{u_i \cdot i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \dfrac{U_{pr}}{U_{sek}}$

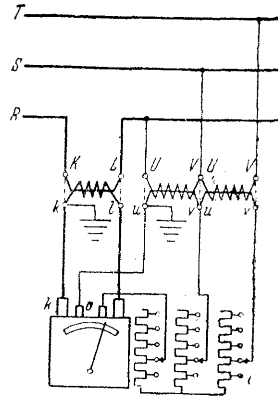
sa strujnim i naponskim transformatorom $C = \dfrac{u_i \cdot i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \dfrac{I_{pr}}{I_{sek}} \cdot \dfrac{U_{pr}}{U_{sek}}$

snaga $N = 3 \cdot C \cdot \alpha$ u W

Sl. 195. Mjerenje snage kod trofazne struje s jednako opterećenim fazama i pristupačnom nultočkom

umjetnu nultočku spajanjem triju otpornika u zvijezdu. Vrijednost otpora, koji je spojen u seriju s naponskom granom vatmetra, treba uzeti manju od otpora u obje preostale faze za vlastiti otpor naponske grane. I ovdje





Mjerna konstanta:

bez mjernih transformatora $C = \dfrac{u_i \cdot i_i}{\alpha_{uk}}$ ili $\dfrac{1}{\sqrt{3}} \cdot \dfrac{u_{lin_{otp}} \cdot i_i}{\alpha_{uk}}$

samo sa strujnim transformatorom

$$C = \frac{u_i \cdot i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{I_{pr}}{I_{sek}} \text{ ili } \frac{1}{\sqrt{3}} \quad \frac{u_{lin_{otp}} \cdot i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{I_{pr}}{I_{sek}}$$

samo s naponskim transformatorom

$$C = \frac{u_i \cdot i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sek}} \text{ ili } \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{u_{lin_{otp}} \cdot i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sek}}$$

sa strujnim i naponskim transformatorom

$$C = \frac{u_i \quad i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{I_{pr}}{I_{sek}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sek}} \text{ ili } \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{u_{lin_{otp}} \cdot i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{I_{pr}}{I_{sek}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sek}}$$

u_i = nominalni napon instrumenta uzevši u obzir predotpor do zvjezdišta (većinom 1000 oma na 30 V).

$_{lin\,otp} = \sqrt{3} \cdot u_i$ = nominalni napon na stezaljkama trofaznog otpornika. Treba paziti, jer se vrijednost gdjekada navodi zaokruženo; u tom slučaju treba upotrebljavati označenu vrijednost za C, koja onda vrijedi za sve tri faze. Snaga $N = 3 \cdot C \cdot \alpha$ u W.

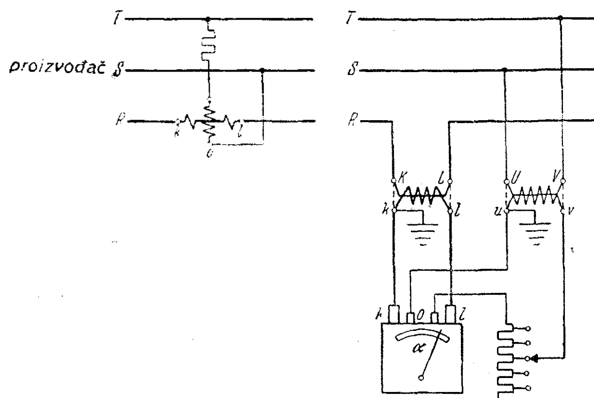
Sl. 196. Mjerenje snage kod trofazne struje s jednako opterećenim fazama uz pomoć umjetne nu točke

je ukupna snaga jednaka trostrukoj snazi, koju pokazuje instrument. Mjernu konstantu izračunavamo prema sl. 196, no obično je označena na pripadnom zvjezdišnom otporniku.

Mjerenje jalove snage kod trofazne struje s jednako opterećenim fazama. Prema sl. 197, teče kroz strujnu granu struja jedne faze, dok naponsku granu priključimo na linijski napon obiju preostalih faza. Pokazivanje instrumenta zapravo je dakle proporcionalno s produktom

$I \cdot U_f \cdot \sqrt{3} \cdot \sin \varphi$. Da dobijemo ukupnu trofaznu jalovu snagu, treba zato pokazivanje instrumenta množiti s $\sqrt{3}$, odnosno treba računati s mjernom konstantom, povećanom u omjeru $\sqrt{3}/1$.

Mjerenje djelatne snage kod trofazne struje s jednako ili različito opterećenim fazama s pomoću dvaju vatmetara. Sl. 198 prikazuje način mjerenja s dva instrumenta, koje se primjenjuje u velikoj većini slučajeva. U strujnim granama teku struje bilo kojih dviju faza, a pripadne naponske



Mjerna konstanta:

bez mjernih transformatora $C = \frac{u_i \cdot i_i}{\alpha_{uk}}$

samo sa strujnim transformatorom $C = \frac{u_i \cdot i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{I_{pr}}{I_{sek}}$

samo s naponskim transformatorom $C = \frac{u_i \cdot i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sek}}$

sa strujnim i naponskim transformatorom $C = \frac{u_i \cdot i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{I_{pr}}{I_{sek}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sek}}$

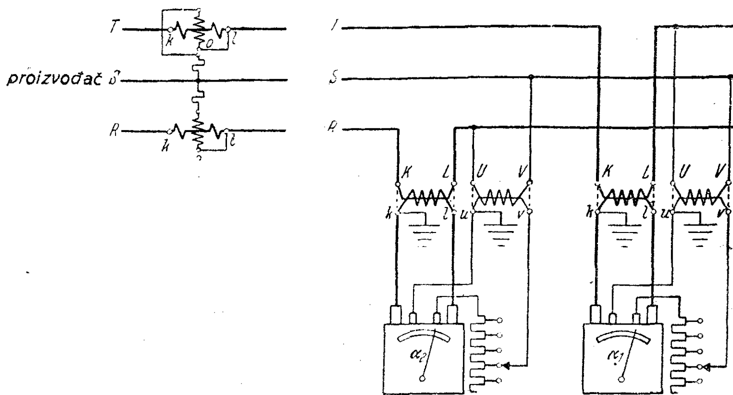
jalova snaga $N_j = \sqrt{3} \cdot C \quad \alpha$ u VA

Sl. 197. Mjerenje jalove snage kod trofazne struje s jednako opterećenim fazama

grane priključujemo na vlastitu i na treću fazu. Ukupnu snagu triju faza dobivamo iz sume obaju otklona prema izvodu uz sl. 199 kao $N = C \cdot (\alpha_1 + \alpha_2)$, gdje treba uzeti u obzir predznak svakog otklona.

Kod *jednakog* opterećenja u sve tri faze zavise otkloni α_1 prvog i α_2 drugog instrumenta o kutu φ između napona i struje. Sl. 200 prikazuje tu zavisnost. Razabiramo, da α_1 i α_2 poprimaju sve vrijednosti između pozitivne i negativne maksimalne vrijednosti. Obrnuto možemo iz predznaka i omjera veličina manjeg prema većem otklonu na jednostavan način odrediti kut faznog pomaka φ, odnosno $\cos \varphi$. Sl. 201 prikazuje zavisnost između kuta φ, njegovog kosinusa i sinusa, te omjera otklona vatmetra. Pod

α_{mali} razumijevamo uvijek manji, a pod α_{veliki} uvijek veći otklon. Koji »okiant« dolazi u obzir zavisi o tome, da li je vrijednost α_1 ili α_2 veća, te koji su im predznaci. To je protumačeno na primjeru navedenom uz sl. 201. Potrebno je, naravno, dogovoriti se o označivanju s α_1 ili α_2. Na sl. 202 vidimo oznake, na kojima se osnivaju prikazi. Općenito možemo reći, da je α_2 otklon onog vatmetra, koji je uključen u vremenski kasniju fazu. Kod asinhronih motora u praznom hodu, kod neopterećenih transformatora ili prigušnica, koji uzimaju struju magnetiziranja iz mreže, bit će α_1 pozitivan i veći, a α_2 negativan i manji otklon.



Mjerna konstanta:

bez mjernih transformatora $C = \dfrac{u_i \cdot i_i}{\alpha_{uk}}$

samo sa strujnim transformatorom $C = \dfrac{u_i \cdot i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \dfrac{I_{pr}}{I_{sek}}$

samo s naponskim transformatorom $C = \dfrac{u_i \cdot i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \dfrac{U_{pr}}{U_{sek}}$

sa strujnim i naponskim transformatorom $C = \dfrac{u_i \cdot i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \dfrac{U_{pr}}{U_{sek}} \cdot \dfrac{I_{pr}}{I_{sek}}$

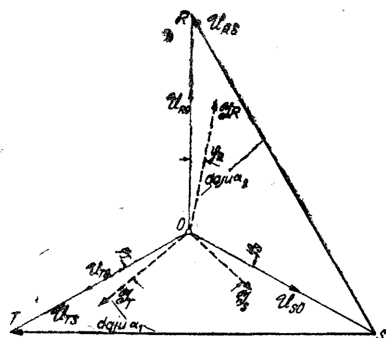
snaga $N = C\,(\alpha_1 + \alpha_2)$. Paziti na predznak!

Sl. 198. Mjerenje snage kod trofazne struje s bilo kako opterećenim fazama u spoju s dva vatmetra (oznake stezaljki instrumenata kao na sl. 195).

Za brzo određivanje cos φ služimo se u ispitnoj stanici skalom prema sl. 203, na kojoj je s jedne strane nanesen faktor snage, a s druge strane omjer otklona vatmetara.

Mjerenje jalove snage kod trofazne struje s jednako ili različito opterećenim fazama s pomoću dvaju vatmetara. Spoj prema sl. 204 omogućuje mjerenje jalove snage i kod nejednako opterećenih faza. U praksi ispitivanja strojeva vrlo ga rijetko primjenjujemo, jer tamo gotovo uvijek mo-

žemo računati s jednakim opterećenjem faza. Kod mjerenja izvan ispitne stanice upotrebljava se samo gdjekada. S pomoću prikladnog višestrukog otpornika i preklopke možemo ovaj spoj brzo dobiti preklapanjem iz spoja dvaju vatmetara. Mjerna konstanta označena je na tim kombiniranim otpornicima ili je izračunavamo prema podacima na sl. 204. U ispit-



Izvod **A**. Mjerna konstanta $= C$.
Momentane su vrijednosti za

linijske napone:	u_{RS}	u_{ST}	u_{TR}
fazne napone:	u_{RO}	u_{SO}	u_{TO}
fazne struje:	i_R	i_S	i_T

pri čemu je $i_R + i_S + i_T = 0$,

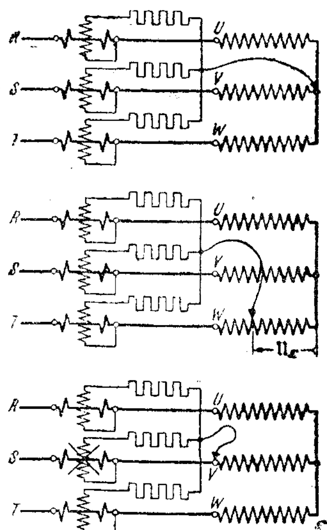
fazne snage: $u_{RO} \cdot i_R$ u_{SO} i_S $u_{TO} \cdot i_T$

a njihova je suma jednaka momentanoj vrijednosti n ukupne snage N.

Instrument u fazi T (sl. 198) s otklonom α_1 pokazuje vremensku srednju vrijednost $(u_{TS} \cdot i_T) \cdot \frac{1}{C}$, instrument u fazi R s otklonom α_2 vremensku srednju vrijednost$(u_{RS}\ i_R)\ \frac{1}{C}$. Zbroj $\alpha_1 + \alpha_2$ jednak je dakle srednjoj vrijednosti $(u_{RS} \cdot i_R + u_{TS}\ i_T)\frac{1}{C}$. Rastavljanjem linijskih napona u_{RS} i u_{TS} na odgovarajuće fazne napone dobivamo:

$$(u_{RS} \cdot i_R + u_{TS}\ i_T) = (u_{RO} - u_{SO})\ i_R + (u_{TO} - u_{SO})\ i_T = u_{RO}\ i_R + u_{SO}(-i_R - i_T) + u_{TO}\ i_T.$$

Kako je međutim $i_R + i_S + i_T = 0$, dakle $(-i_R - i_T) = i_S$, slijedi: $(u_{RS} \cdot i_R + u_{TS}\ i_T) = (u_{RO}\ i_R + u_{SO}\ i_S + u_{TO}\ i_T) = n$. Biti će dakle $C(\alpha_1 + \alpha_2) = N$.



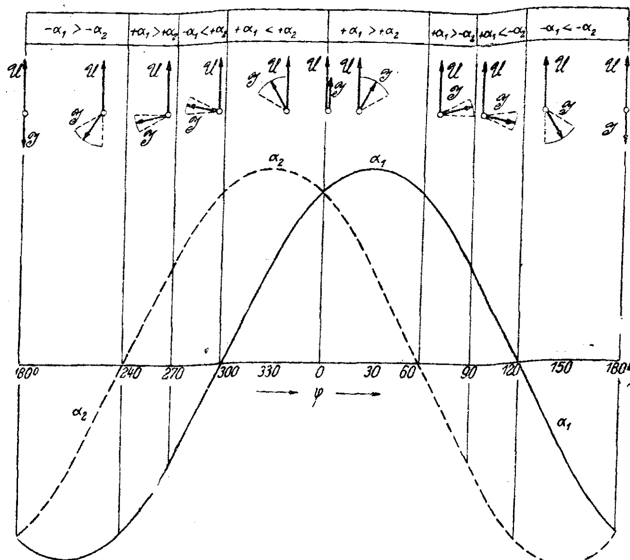
Izvod B:

1. Spoj s tri vatmetra; svaka naponska grana priključena je na fazni napon, koji odgovara strujnoj grani. Snaga = (očitanje triju instrumenata) $C = (\alpha_R + \alpha_S + \alpha_T)\ C$.

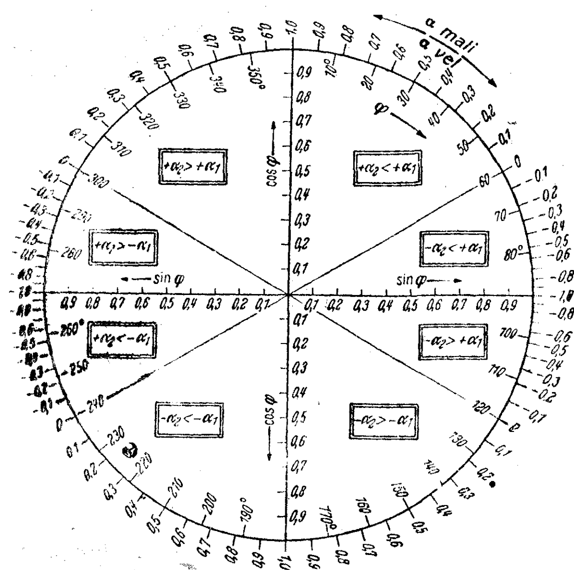
Spoj s tri vatmetra; svaka naponska grana priključena je na sumu faznog napona i proizvoljnog dodatnog napona $\mathcal{U}_X$. Pojedina se očitanja mijenjaju, no ukupna suma ostaje ista, jer $\mathcal{U}_X$ sa svim trim strujama $\mathcal{I}_R$, $\mathcal{I}_S$, $\mathcal{I}_T$ zajedno ne može dati nikakve snage, budući da je suma struja jednaka nuli.

3. Spoj s tri vatmetra, gdje je na pr. uzeto $\mathcal{U}_X = \mathcal{U}_{SO}$. Kako vidimo, naponska je grana vatmetra u fazi S priključena na napon nula; instrument ne pokazuje više ništa, pa ga možemo ukloniti. Na taj način nastaje traženi spoj s 2 vatmetra. Kao gore, dobivamo snagu iz sume očitanja svih instrumenata: snaga = (očitanje instrumenta u fazi R) $C + 0 +$ (očitanje instrumenta u fazi T) $\cdot C = (\alpha_R + \alpha_T) \cdot C$. Na isti način možemo učiniti da očitanje kojeg drugog instrumenta bude jednako nuli. Preostali instrumenti predstavljaju uvijek spoj s dva vatmetra prema sl. 198 i 202.

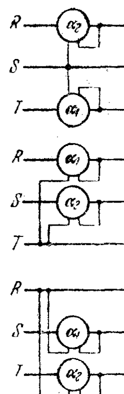
Sl. 199. Dva izvoda za spoj s dva vatmetra prema sl. 198 i 202.



Sl. 200. Zavisnost otklona vatmetara α_1 i α_2 o kutu faznog pomaka φ između faznog napona $\mathcal{U}$ i struje $\mathcal{I}$ kod spoja s dva vatmetra prema sl. 198. (Jednako opterećenje faza!)



Sl. 201. Zavisnost između faznog kuta φ, omjera otklona vatmetara $\alpha_{mali}/\alpha_{veliki}$, faktora snage $\cos\varphi$, i faktora jalove snage $\sin\varphi$ uz jednako opterećene faze. (Primjer: $\alpha_1 = +88$, $\alpha_2 = +22$; prema tome je $+\alpha_2 < +\alpha_1$, te $\alpha_{mali}/\alpha_{veliki} = +0{,}25$. Dobivamo $\varphi = 46^0$, $\cos\varphi = 0{,}69$, $\sin\varphi = 0{,}72$).

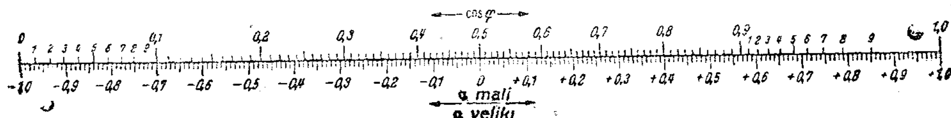


Sl 202. Označivanje otklona vatmetara s α_1 i α_2 za tri moguća rasporeda instrumenata u dvije od triju faza mreže. α_1 je otklon u vremenski ranijoj fazi, α_2 otklon u vremenski kasnijoj fazi. Vremenski redoslijed dviju faza je *RS*, *ST* i *TR*.

noj stanici izračunavamo jalovu snagu isto kao kod jednofaznih mjerenja s pomoću sin φ, koji smo odredili iz cos φ. Vrijedi:

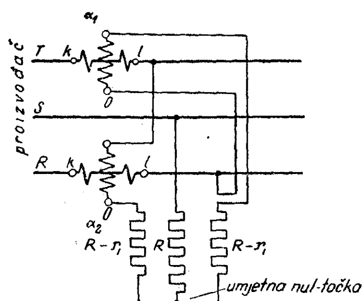
$$N_j = \sqrt{3} \cdot U_{lin} \cdot I \cdot \sin\varphi \quad \text{uz} \quad \sin\varphi = \sqrt{1 - \cos^2\varphi}.$$

Mjerenje snage trofazne struje kod kojeg se pomažemo jednim vatmetrom. Kod strojeva za visoki napon često nalazimo na licu mjesta samo



Sl. 203. Zavisnost između faktora snage cos φ i omjera malog prema velikom otklonu vatmetra $\alpha_{mali}/\alpha_{veliki}$. Omjer je pozitivan, kad su oba otklona istog predznaka, negativan, kad su im predznaci različiti.

jedan strujni transfomator i jedan jednofazni naponski transformator, koji je priključen bilo na obje preostale faze, bilo na fazu strujnog transformatora i jednu od ostalih dviju faza. U ovakvim slučajevima možemo također mjeriti snagu, prema uputama uz sl. 205 i 206.



Mjerna konstanta:

bez mjernih transformatora

$$C = \sqrt{3} \cdot \frac{u_i \cdot i_i}{\alpha_{uk}} \text{ ili } \frac{u_{lin_{otp}} \, i_i}{\alpha_{uk}}$$

samo sa strujnim transformatorom

$$C = \sqrt{3} \cdot \frac{u_i \; i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{I_{pr}}{I_{sek}} \text{ ili } \frac{u_{lin_{otp}} \cdot i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{I_{pr}}{I_{sek}}$$

samo s naponskim transformatorom

$$C = \sqrt{3} \; \frac{u_i \; i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sek}} \text{ ili } \frac{u_{lin_{otp}} \; i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sek}}$$

sa strujnim i naponskim transformatorom

$$C = \sqrt{3} \cdot \frac{u_i \cdot i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{I_{pr}}{I_{sek}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sek}} \quad \text{ili} \quad \frac{u_{lin_{otp}} \cdot i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{I_{pr}}{I_{sek}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sek}}$$

Jalova snaga $N_j = C(\alpha_1 + \alpha_2)$ u VA. Paziti na predznak! Oznake kao na sl. 193, napose u_i = nominalni napon vatmetra uzevši u obzir predotpor do zvjezdišta, te $u_{lin_{otp}}$ = linijski nominalni napon na upotrebljenim stezaljkama otpornika, dakle $u_{lin_{otp}} = u_i \cdot \sqrt{3}$.

Sl. 204. Mjerenje jalove snage kod trofazne struje s bilo kako opterećenim fazama s pomoću dvaju vatmetara.

d) Mjerila faktora snage

U ispitnoj stanici određujemo faktor snage gotovo isključivo iz omjera djelatna snaga/prividna snaga, a kod trofaznih mjerenja još i iz omjera otklona vatmetara $\alpha_{mali}/\alpha_{veliki}$ u spoju s dva vatmetra, uz pomoć odgovarajuće skale (sl. 203).

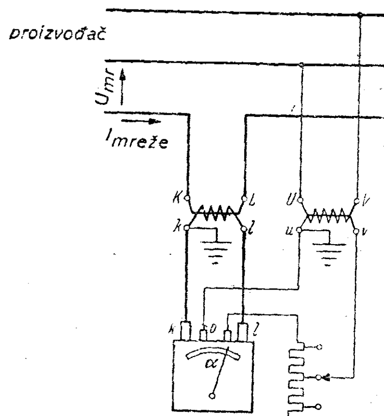
U pogonu radije upotrebljavamo instrumente s neposrednim očitanjem, koji kod jednofazne struje pokazuju faktor snage mreže, a kod trofazne struje faktor snage jedne faze. Uz jednako opterećenje faza podudara se ovaj posljednji s faktorom snage obiju preostalih faza.

Mjerna konstanta:

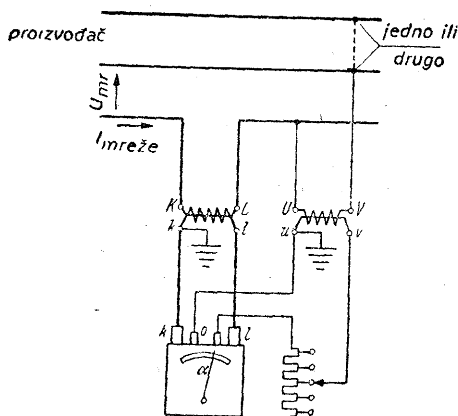
$$C = \frac{u \cdot i}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{I_{pr}}{I_{sek}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sek}}$$

Ukupna snaga: $N = \sqrt{3}\ U_{mreže} \cdot I_{mreže} \cdot \cos\varphi$ u W

$$\cos\varphi = \sqrt{1 - \left(\frac{C\ \alpha}{U_{mreže}\ I_{mreže}}\right)^2}$$



Sl. 205. Mjerenje snage u mrežama visokog napona, kod kojeg se pomažemo jednim strujnim i jednim naponskim transformatorom, koji nije priključen na fazu strujnog transformatora.



Mjerna konstanta:

$$C = \frac{u_i \cdot i_i}{\alpha_{uk}} \cdot \frac{I_{pr}}{I_{sek}} \cdot \frac{U_{pr}}{U_{sek}}$$

Ukupna snaga:

$$N = 1{,}5\ C\ \alpha \left[1 \pm \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{U_{mreže}\ I_{mreže}}{C \cdot \alpha}\right)^2 - 1}\right]$$

u W.

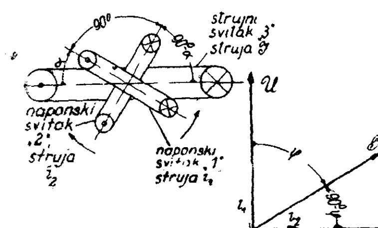
Treba uzeti apsolutnu vrijednost; o predznaku drugog člana odlučuje veličina $I_{mreže}$, odnosno veličina $\cos\varphi$ koju očekujemo, a kojoj odgovara veća ili manja snaga.

Sl. 206. Mjerenje snage u mrežama visokog napona, kod kojeg se pomažemo jednim strujnim i jednim naponskim transformatorom, koji je jednom stezaljkom priključen na fazu strujnog transformatora.

Primjenjuju se instrumenti građeni kao instrumenti s unakrsnim svicima ili s unakrsnim željezom, te izvedeni bez željeza ili sa željeznim magnetskim krugom. Dva međusobno razmaknuta naponska svitka daju sa strujnim svitkom suprotne zakretne momente, koji po veličini zavise o kutu zakreta. Kako nema povratne sile pera, postavit će se vrtivi dio u položaj, u kojemu su oba suprotna momenta u ravnoteži. Može biti strujni svitak

nepomičan, a oba naponska svitka pomična (instrument s unakrsnim svicima) ili se strujni svitak okreće u četveropolnom željeznom okviru, koji uzbuđuju naponski svici (instrument s unakrsnim željezom).

Karakteristično je za sva cos φ-mjerila, da nemaju pravog nul-položaja, u koji bi se vraćala kazaljka instrumenta, kad nije priključen. Točnost mjerenja kreće se oko 1 do 2 stupnja, te pada, kad se struja smanjuje. Zavisnost o frekvenciji velika je kod svih instrumenata, koji rade s prigušnicama, dok je utjecaj priključenog napona znatno manji.



a) Prostorna slika Vremenski dijagram

Izv•d za spoj *b* i *c*.

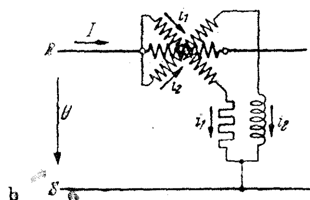
$M_1 = C_1 \cdot I\ i_1 \cdot \cos\varphi\ \sin\alpha, \quad M_2 = C_2 \cdot I \cdot i_2 \cdot \cos(90^0 - \varphi) \cdot$
$\cdot \sin(90^0 - \alpha)$;

budući da je $M_1 = M_2$, dobivamo: $C_1\ i_1$ eos $\varphi \cdot \sin\alpha =$
$= C_2\ i_2 \cdot \cos(90^0 - \varphi)\ \sin(90^0 - \alpha)$;

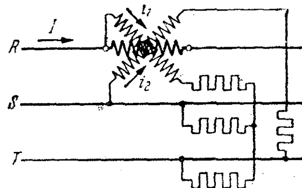
uzmemo li $C_1 i_1 = C_2 i_2$, bit će: $\cos\varphi \cdot \sin\alpha = \sin\varphi \cdot \cos\alpha$

$$\text{tg}\,\alpha = \text{tg}\,\varphi,$$

$$\alpha = \varphi.$$



b) Spoj kod jednofazne struje (zavisnost o frekvenciji zbog prigušnice).



c) Spoj kod trofazne struje (nema zavisnosti o frekvenciji)

Sl. 207. Instrument s unakrsnim svicima za mjerenje cos φ kod jednofazne i trofazne struje (struje u naponskim svicima međusobno su fazno pomaknute za 90⁰)

Na skali su označene vrijednosti cos φ; gdjekada je na drugoj skali označen kut φ. Instrumenti u uređajima, u kojima se snaga uzima i daje, izvedeni su sa skalom od 360⁰, koja je u svakoj četvrtini podijeljena od cos φ = 0 do 1,0. Iz položaja kazaljke unutar pojedinih četvrtina razabiramo prilike preuzbude ili poduzbude kod primanja ili davanja snage.

Mjerila faktora snage upotrebljavamo, osim za pokazivanje, često i za registriranje.

Mjerenja u jednofaznoj mreži. Instrument s unakrsnim svicima: Prema sl. 207a, b mrežna struja *I* teče kroz nepomični strujni svitak *3*, dok su oba naponska svitka priključena na mrežu. Upotrebom u seriju spojenih prigušnica i otpornika postizavamo, da kroz svitak *1* teče struja i_1 u fazi s naponom i s ovim proporcionalna, te da u svitku 2 teče struja i_2 također

proporcionalna, ali koja fazno zaostaje za 90⁰. Oba naponska svitka prostorno su međusobno razmaknuta za 90⁰, te se mogu okretati. Može se dokazati, da je $\operatorname{tg}\alpha = C \cdot \operatorname{tg}\varphi$, dakle da je kut zakreta kazaljke funkcija faznog kuta.

Izvod:

$M_1 = C_1 \cdot I \cdot i_1 \cdot \cos(\varphi + 30^0) \sin\alpha,$

$M_2 = C_2 \cdot I \cdot i_2 \cos(\varphi - 30^0) \sin(90^0 - \alpha);$

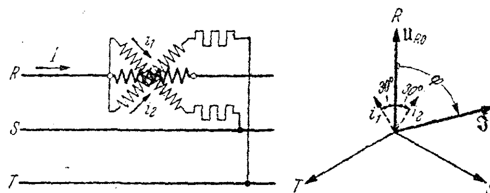
budući da je $M_1 = M_2$, dobivamo uz

$$C_1 i_1 = C_2 i_2:$$

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\cos(\varphi - 30^0)}{\cos(\varphi + 30^0)}.$$

Preuređivanjem dobivamo odavle:

$$\operatorname{tg}\varphi = \sqrt{3} \cdot \operatorname{tg}(\alpha - 45^0).$$

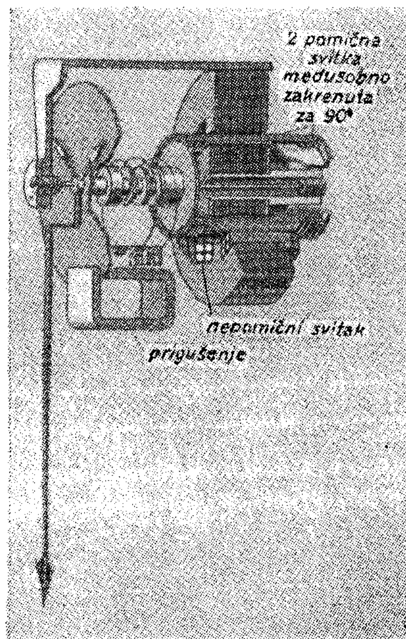


Spoj (nezavisan o frekvenciji) Vremenski dijagram

Sl. 208. Instrument s unakrsnim svicima za mjerenje cos φ kod trofazne struje. (Struje u naponskim svicima međusobno su fazno pomaknute za 60⁰).

Prema izboru konstante C možemo dobiti više ili manje rastegnutu skalu. Za $C = 1$ bit će $\alpha = \varphi$. Instrument je jako zavisan o frekvenciji.

Mjerenja u trofaznoj mreži. Instrument s unakrsnim svicima: Sl. 207c i 208 prikazuju spoj i izvod za instrument s unakrsnim svicima za trofaznu struju. Naponski svici priključeni su na linijske napone preko djelatnih predotpornika i u njima teku struje i_1 i i_2, koje su međusobno pomaknute u fazi za 60 ili za 90⁰. Posebne prigušnice otpadaju, te je zavisnost instrumenta o frekvenciji jako smanjena. Sl. 209 prikazuje sastav instrumenta s unakrsnim svicima.

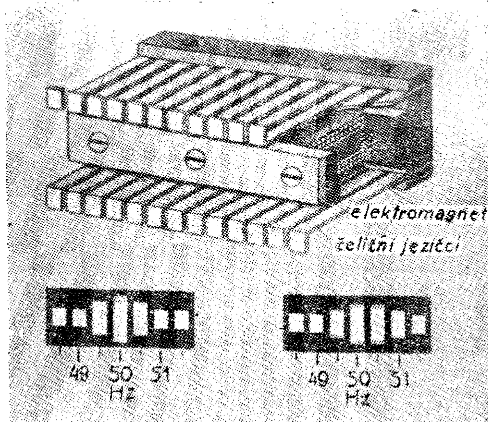


Sl. 209. Sastav instrumenta s unakrsnim svicima

e) Mjerila frekvencije

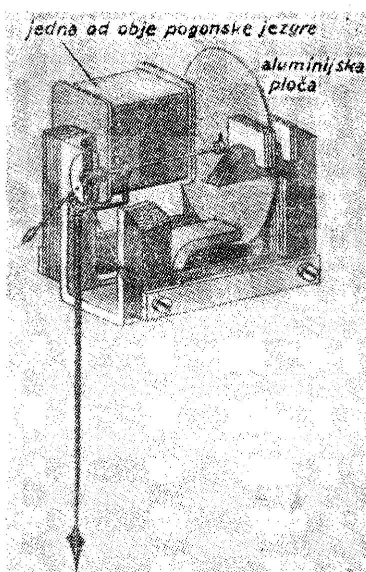
Ako upotrebljavamo mrežu, koja je priključena na veliki sistem za opskrbu energijom, bit će mjerenje frekvencije većinom suvišno, jer se ova održava s točnošću od 0,1 do 0,2⁰/₀. Radimo li pak s pretvaračima ispitne stanice, koje tjeramo istosmjernim motorom, uobičajeno je priključiti paralelno s voltmetrom još i mjerilo frekvencije, koje nam omogućuje da održavanje tražene frekvencije udobnije i točnije očitavamo, no što bi to bilo moguće običnom ta-

metrom. U ispitnoj stanici upotrebljavamo najčešće mjerilo frekvencije s jezičcima. Široko mjerno područje omogućuje općenitu upotrebu ovog instrumenta. U stalnim uređajima ugrađujemo osim toga često i indukcione instrumente i instrumente s unakrsnim svicima, odnosno unakrsnim željezom. Mjerni opseg seže kod ovih tek malo iznad i ispod nominalne frekvencije, koju treba održavati pa je zbog toga točnost očitavanja znatno veća.



Sl. 210. Sastav mjerila frekvencije s jezičcima. (Očitanje lijevo = 50 Hz, očitanje desno = 50,25 Hz.)

Mjerilo frekvencije s jezičcima. Mjerilo frekvencije s jezičcima osniva se na principu rezonancije. Mreža uzbuduje magnet, koji djeluje bilo neposredno (Hartmann-Kempf), bilo posredno, preko prečke, na kojoj su smješteni (Frahm), na niz plosnatih čeličnih pera, koja su s jedne strane upeta. Vlastite frekvencije titranja pera rastu od 0,5 do 0,5 Hz. Kad se magnet uzbudi, titrat će jako ono pero, kojemu se vlastita frekvencija titranja podudara s dvostrukom frekvencijom mreže. Kod upotrebe polariziranog magneta, što obično možemo udesiti preklapanjem, titrat će pero u rezonanciji sa samom frekvencijom mreže. Ako samo jedno pero vrlo jako titra, očitavamo na skali iznad njega. Ako dva pera podjednako jako titraju, procijenimo frekvenciju kao srednju vrijednost iz obje pripadne frekvencije. Ispod 0,25 Hz teško da možemo povećati točnost mjerenja. Ugrađeni predotpornici omogućuju priključak na različite napone. Točnost pokazivanja ne mijenja se kod promjena napona, kao ni kod promjena temperature. Tokom vremena mijenja se katkada neznatno frekvencija titranja pera, što treba nadzirati povremenim ispitivanjem. Sl. 210 prikazuje uobičajenu izvedbu prema Hartmann-Kempfu (presjek i skalu).



Sl 211. Sastav indukcionog mjerila frekvencije

Indukciono mjerilo frekvencije. Na aluminijsku ploču, koja je ekscentrično vrtiva djeluju u suprotnom smislu dvije pogonske jezgre. Njihovi namoti priključeni su na napon mreže preko

djelatnog otpora, odnosno preko titrajnog kruga. Struja u drugoj jezgri jako zavisi o frekvenciji. Zakretni momenti mijenjaju se s položajem ploče, koja će se postaviti tako, da oba budu u ravnoteži. Protusile nema. Da bi se kazaljka postavila bez titranja, izvedeno je prigušenje. Promjene napona u granicama ± 20% gotovo ne utječu na pokazivanje instrumenta. Sl. 211 prikazuje izvedbu takva instrumenta.

Mjerilo frekvencije s unakrsnim željezom. Sl. 212 prikazuje spoj instrumenta s unakrsnim željezom, koji je po svojem sastavu jednak mjerilu faktora snage. Struja i_1 jedne grane teče kroz svitke dvaju polova

Izvod:

$$M_1 = C_1 \cdot i_1 \; i_1 \cdot \cos\alpha, \quad i_1 = U \, 2\pi f \; C$$

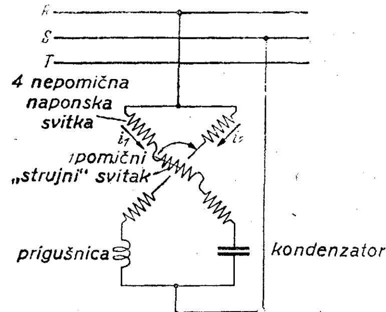
$$M_2 = C_2 \; i_1 \cdot i_2 \; \sin\alpha, \quad i_2 = \frac{U}{2\pi f \cdot L},$$

α = kut između pomičnog svitka i „prigušnica",
L = induktivitet, C = kapacitet.
Budući da je $M_1 = M_2$, biti će:

$$C_1 \cdot U \; 2\pi f \; C \cdot \cos\alpha = C_2 \cdot \frac{U}{2\pi f \cdot L} \cdot \sin\alpha,$$

te ako je $C_1 = C_2$:

$$\operatorname{tg}\alpha = (2\pi)^2 \cdot L \cdot C \cdot f^2 = C_3 \cdot f^2.$$



Sl. 212. **Mjerilo frekvencije s unakrsnim željezom za jednofaznu ili trofaznu struju.**

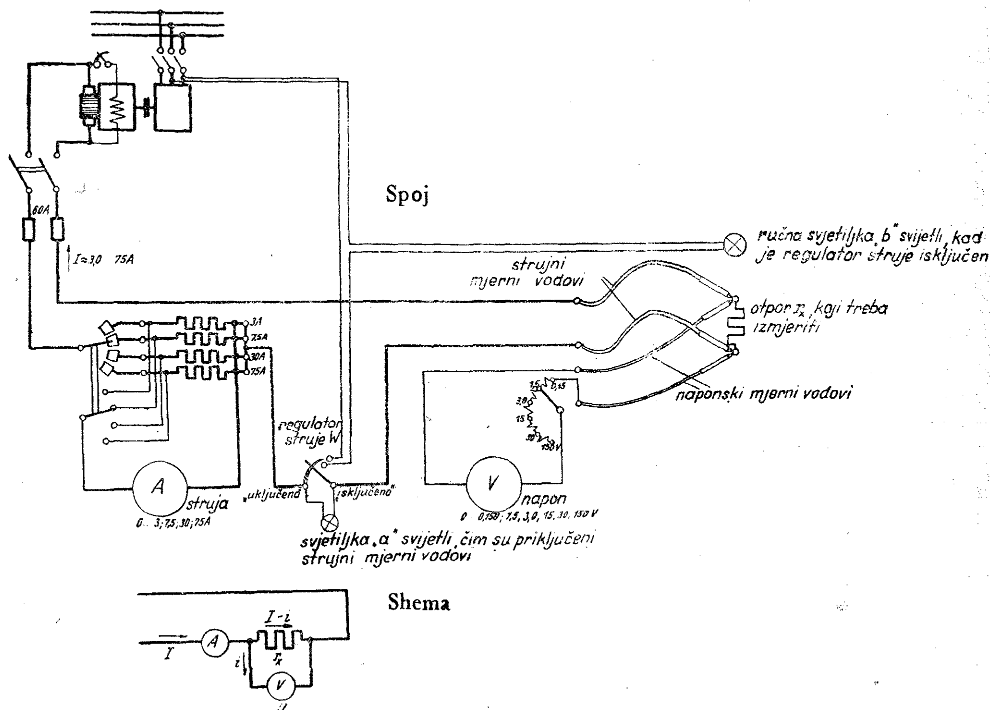
željezne jezgre i kroz zakretni svitak. Ona se povećava, kad frekvencija raste, jer je u seriju spojen kondenzator. Struja i_2 druge grane teče kroz preostala dva svitka, i smanjuje se, kad frekvencija raste, jer je u seriju spojena prigušnica. Pokazivanje instrumenta zavisi o omjeru obiju struja, te prema tome odgovara frekvenciji, dok je u određenim granicama nezavisno o promjenama napona. Protusile pera nema.

f) Mjerenje djelatnih otpora

Djelatne otpore mjerimo u praksi uglavnom na tri različita načina. Metodi struja-napon dajemo prednost kod otpora ispod 1/1000 Ω, no upotrebljavamo je i do vrijednosti od nekoliko stotina oma. Thomsonov most služi za područje mjerenja od 1/1000 Ω do cca 10 Ω, a Wheatstoneov, koji je gdjekada u izvedbi spojen s Thomsonovim mostom, za mjerenje vrijednosti od 1,0 do 1000 Ω.

Metoda struja-napon. Kod ove metode šaljemo kroz otpor, koji treba izmjeriti istosmjernu struju veličine od 1 do 75 A, te mjerimo voltmetrom pad napona na ovome. Korekcija s obzirom na vlastiti potrošak voltmetra u spoju prema sl. 213, obično nije potrebna, jer instrument (milivoltmetar s predotpornicima) uzima kod punog otklona samo struju od cca · 30 mA. Slika prikazuje mjerni uređaj, koji je osobito prilagođen praktičkim potrebama. Mjernu struju uzimamo iz posebnog agregata te je preko regu-

lacionih otpornika strujnim mjernim vodovima dovodimo do otpora. Pad napona uzimamo posebnim naponskim mjernim vodovima i očitavamo ga na voltmetru. S pomoću preklopke možemo po izboru uključiti različite poredne otpornike za vrijednosti od 3,0 do 75 A, a s pomoću druge preklopke možemo uključiti po izboru različite predotpornike za voltmetar, za mjerna područja od 0,15 do 150 V. Jakost mjerne struje možemo regulacionim otpornikom W udešavati od 0 do 75 A. Mjerenje namota strojeva, koji gotovo uvijek imaju velik induktivitet, zahtijeva neke po-



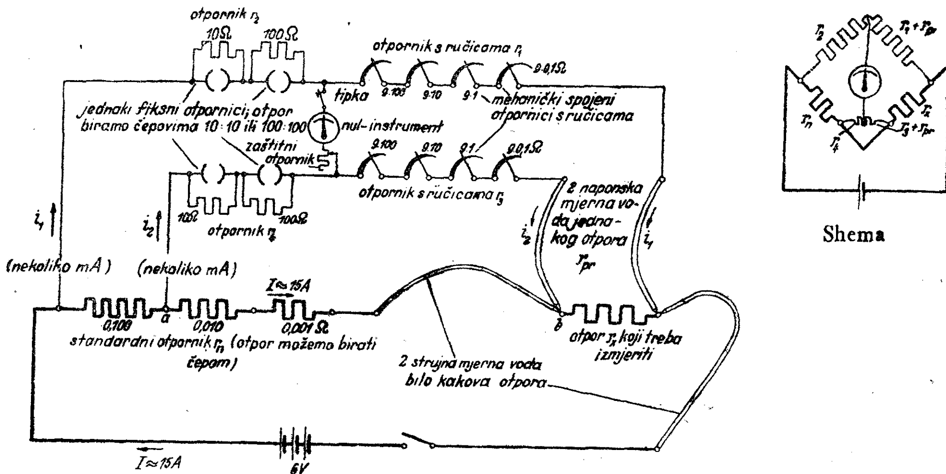
$$r_x = \frac{U}{I - i_{instr}} \approx \frac{U}{I},$$ jer struja u voltmetru iznosi svega nekoliko miliampera.

Sl. 213. Mjerenje otpora metodom „struja-napon“

sebne mjere opreza. Strujne mjerne vodove smijemo priključiti, a pogotovo opet odvojiti, jedino kad struje gotovo nema, jer u protivnom slučaju luk, koji nastaje, može zaslijepiti i ugroziti rukovaoca. U tu svrhu predviđena je ručna svjetiljka *b*, koja svijetli jedino u nul-položaju otpornika za regulaciju struje, te daje znak za priključivanje strujnih mjernih vodova. Čim su ovi spojeni na stezaljke otpora, zatvara se preko ovoga strujni krug svjetiljke *a* na mjernom stolu, koja daje svjetlom znak, da sada možemo kroz mjerni krug pustiti jaku mjernu struju. Ručna svjetiljka *b*

ugasi se, čim pomaknemo regulacioni otpornik W, te sada upozorava, da mjerne vodove ne smijemo više odvajati. Čim smo očitali struju i napon, vratimo regulator struje W u nul- položaj, i time prekinemo mjernu struju. U istom času ručna svjetiljka b na mjestu mjerenja opet zasvijetli i pokazuje, da je mjerenje završeno i da mjerne vodove možemo odvojiti. Treba paziti, da mjerna struja nipošto ne bude reda veličine nominalne struju namota, koji mjerimo, jer bi došlo do nedopuštena zagrijavanja za vrijeme mjerenja. Prikladna je mjerna struja od 0,1 do 0,25 nominalne struje, ako mjerenje ne traje odviše dugo.

Thomsonov most. Thomsonov most upotrebljavamo ponajčešće, jer otpori namota većinom leže u području od 1,000 do 0,001 Ω. Sl. 214 pri-



Spoj

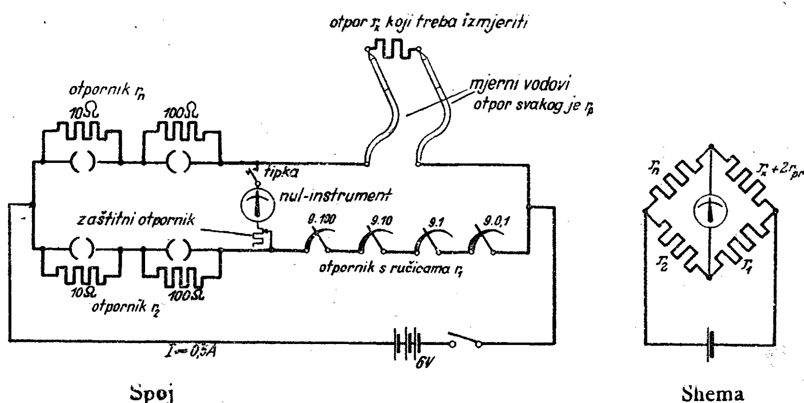
$r_x = r_n \cdot \frac{r_1 + r_{pr}}{r_2}$, ako uzmemo $\frac{r_1 + r_{pr}}{r_3 + r_{pr}} = \frac{r_2}{r_4}$. To postizavamo jednakim otporima r_1 i r_3, kao i r_2 i r_4.

Sl. 214. Thomsonov most. Praktičko područje mjerenja $r_x = 0{,}001 - 10{,}0\,\Omega$.

kazuje jedan od spojeva za praktičnu upotrebu. Mjerna struja, koju daje akumulator od 6 V, teče kroz standardne otpornike r_n od 0,1, 0,01 i 0,001 Ω spojene u seriju, te je dovodimo preko dva strujna mjerna voda otporu, koji treba izmjeriti r_x. Pad napona na jednom od ugrađenih standardnih otpornika, koji možemo birati čepom i pad napona na otporu, koji treba izmjeriti (ovaj uzimamo preko posebnih naponskih mjernih vodova) dovodimo samom mostu, koji se sastoji od dvije potpuno jednako složene grane. Ove su sastavljene od dva stalna otpornika r_2 i r_4, svaki od 10 plus 100 Ω, i otpornika za udešavanje sa četiri ručice r_1 i r_3. Uz oznake prema sl. 214 dobivamo $r_x = r_n \cdot \frac{r_1 + r_{pr}}{r_2}$, ako smo udesili da bude $\frac{r_1 + r_{pr}}{r_3 + r_{pr}} =$

$= \frac{r_2}{r_4}$. Uvijek je r_1 jednako r_3, jer su ručice spojene, dok r_2 moramo udesiti, da bude jednako r_4 izvlačenjem odgovarajućeg čepa. r_{pr} je otpor jednog mjernog voda, koji se obično smije zanemariti.

Kod opisanog mosta imamo četiri mjerna područja. Korekcija, koju praktički tek rijetko uzimamo, sastoji se od toga, što vrijednosti otpora r_1, koju udešavamo ručicom, treba u gornjoj formuli dodati još otpor jednog naponskog mjernog voda. Kako se otpor ručicom regulira od 100 do 999,9 Ω, dok otpor naponskog mjernog voda iznosi tek cca 0,1 Ω, bit će korekcija neznatna. Jakost mjerne struje kreće se od 1,0 do 20,0 A.



$$r_x = r_n \cdot \frac{r_1}{r_2} - 2\, r_{pr}$$

$\frac{r_n}{r_2}$ možemo čepovima udesiti na $\frac{100}{10}$, $\frac{100}{100}$ ili $\frac{10}{100}$

r_1 možemo ručicama udešavati od 0,1 do 999,9 Ω.

Sl. 215. **Wheatstoneov most. Praktičko područje mjerenja** $r_x = 10 - 9999\ \Omega$.

Most dovodimo u ravnotežu promatrajući nul-instrument, kojemu je u seriju dodan visokoomski stepenasti otpornik. Ovaj treba da zaštiti instrument od preopterećenja, dok most još nije u ravnoteži ili je tek grubo udešen, te ga postepeno isključujemo usporedo sa sve finijim udešavanjem. Tek kod gotovo potpuno postignute ravnoteže radimo samo sa nul-instrumentom. Odvajanje mjernih vodova za vrijeme udešavanja ugrožava nul-instrument, te je dopušteno tek na posebni znak (zvono), pošto smo otvorili poprečnu granu, u kojoj leži instrument.

Wheatstoneov most. Wheatstoneov most je prikazan na sl. 215. Kako je poznato, dobivamo nepoznati otpor kao:

$$r_x = r_n \cdot \frac{r_1}{r_2} - 2 r_{pr} \cdot$$

Mijenjamo li vrijednost r_n od 10 na 100 Ω i vrijednost r_2 od 10 na 100 Ω,

dobit ćemo tri različita mjerna područja od 10 do 9999 Ω. Korekcija je konstantna i sastoji se od otpora obaju mjernih vodova. Nul-instrument može se, kao i kod Thomsonovog mosta, oštetiti, ako za vrijeme mjerenja odvojimo mjerne vodove, pa stoga i ovdje smijemo ove odvojiti od otpora tek na posebni znak.

Kako se vrijednost mjerne struje kreće samo do cca 0,5 A, nije odvajanje pod strujom inače opasno za rukovaoca, ali ga treba ipak izbjegavati. Uvijek se preporučuje dobro osvjetljenje na mjestu mjerenja, koje znatno olakšava ispravno stavljanje i prislanjanje mjernih vodova. Svaki uređaj za mjerenje otpora treba od vremena do vremena kontrolirati s pomoću standardnog otpornika.

g) Mjerenje induktivnog otpora i induktiviteta

Odnos induktivnog otpora i induktiviteta zavisi o frekvenciji:

$$\text{induktivni otpor} = 2\pi \cdot \text{frekvencija} \cdot \text{induktivitet}$$

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L,$$

pri čemu treba uvrstiti otpor u omima, frekvenciju u hercima, a induktivitet u henrijima. Otpor mjerimo s pomoću struje i napona uz poznatu frekvenciju. Ovakvo određivanje zadovoljava zahtjevima kod ispitivanja strojeva. Točnije određivanje s pomoću mostova kod ispitivanja strojeva tek rijetko primjenjujemo.

Mjerimo kod različitih vrijednosti napona, koji povećavamo. Očitavamo struju, napon i snagu. Kako je faktor snage većinom vrlo malen, moramo upotrebiti vatmetar s punim otklonom pri $\cos\varphi = 0{,}1 \ldots 0{,}3$, ili se moramo odreći točnog mjerenja gubitaka. Na rezultat to praktički ne utječe.

Induktivni otpor izračunavamo:

$$X_L = \frac{U}{I} \cdot \sin\varphi$$

gdje je U priključeni napon na stezaljkama, I struja, koju otpor uzima, $\sin\varphi = \sqrt{1 - \cos^2\varphi}$.

Kako je $\cos\varphi$ maleno, možemo u većini slučajeva vrlo približno uzeti:

$$X_L \approx \frac{U}{I}, \text{ te } L \approx \frac{U}{I} \cdot \frac{1}{2\pi f}.$$

Vrijednost X_L i L zavisi, kao što je poznato, o zasićenju željeza, te je zato treba kod induktiviteta sa željezom (svi namoti strojeva) odrediti u zavisnosti o naponu ili bolje struji, koju namot uzima, i nanijeti kao

krivulju. Induktivni otpor i induktivitet najveći su kod malih struja, te jako padaju, kad struja raste.

Ako je poznat tok $\Phi = f(I)$, možemo izračunati induktivitet i induktivni otpor kao:

$$L = \Phi \cdot \frac{w}{100 \cdot I} \text{ te } X_L = 2\pi \cdot f \cdot \Phi \cdot \frac{w}{100 \cdot I} \text{ kod istosmjerne struje,}$$

$$L = \frac{\Phi}{\sqrt{2}} \cdot \frac{w}{100 \cdot I} \text{ te } X_L = 2\pi \cdot f \cdot \frac{\Phi}{\sqrt{2}} \cdot \frac{w}{100 \cdot I} \text{ kod izmjenične struje.}$$

Zavisnost $\Phi = f(I)$ možemo u mnogim slučajevima dobiti iz krivulje zasićenja, ako odgovarajućim formulama za napon izračunamo iz EMS tok Φ. Razlika između gornjih formula za istosmjernu i za izmjeničnu struju samo je prividna. U oba slučaja predstavlja Φ kao obično maksimalnu vrijednost toka, no I ne predstavlja kod izmjenične struje pripadnu maksimalnu vrijednost struje, već $\sqrt{2}$ puta manju efektivnu vrijednost. Kod izmjenične struje treba zato uvrstiti za struju vrijednost $\sqrt{2} \cdot I$. Tok Φ treba — kao i u ostalim formulama — uvrstiti u 10^6 maksvela.

h) Kapacitivni otpor i kapacitet

Obje ove veličine vezane su ovom relacijom:

$$\text{kapacitivni otpor} = \frac{1}{2\pi \cdot \text{frekvencija} \cdot \text{kapacitet}},$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C},$$

gdje treba uvrstiti X_C u omima, f u hercima, i C u faradima.

Određivanje, koje se praktički rijetko izvodi, vršimo kao jednokratno mjerenje s pomoću struje i napona, iz kojega dobivamo:

$$X_C = \frac{U}{I} \text{ te } C = \frac{I}{2\pi \cdot f \cdot U},$$

pri čemu zanemarujemo vrlo male gubitke.

Često je poznata snaga kondenzatora pri zadanom naponu. Tada izračunavamo otpor i kapacitet:

$$X_C = \frac{U^2}{N}, \quad C = \frac{N}{2\pi \cdot f \cdot U^2}.$$

Kod trofaznih kondenzatora treba za N uvrstiti 1/3 ukupne snage, a za U kod spoja u zvijezdu $U_{mr}/\sqrt{3}$, a kod spoja u trokut U_{mr}. N treba uvrstiti u VA.

B. MJERENJE MEHANIČKIH VELIČINA

Mjerenje brzine vrtnje. Kod ispitivanja strojeva izvodimo mjerenje većinom t. zv. tahometrom, koji radi ili na principu centrifugalnog njihala ili na principu vrtložnih struja. Točnost mjerenja kreće se oko 0,5 do 1%. Točnija mjerenja, kao što ih trebamo osobito kod određivanja korisnosti iz brzine vrtnje i zakretnog momenta, možemo izvesti brojilom okretaja u vezi sa stop-urom. Kod toga je uvjet, da brzina vrtnje ostaje konstantna za vrijeme mjerenja, koje obično traje tek nekoliko sekunda. Male brzine vrtnje najbolje je prenijeti na tahometar preko točno poznata prijenosa na veću brzinu. Često prigrađujemo kod malih brzina vrtnje mali »tahometarski dinamo«, koji je nezavisno uzbuđen, očitavamo vrlo točno njegov napon voltmetrom sa zakretnim svitkom, i preračunavamo ga, pošto smo jednu točku izbaždarili, u brzinu vrtnje. Kod pokusa zaustavljanja, ova je metoda udobna i pouzdana. Strojeve, kod kojih se brzina vrtnje mijenja samo u umjerenim granicama ili treba da rade s konstantnom brzinom (pretvarači u ispitnim stanicama), opremimo malim davačem frekvencije, koji je spojen na mjerilo frekvencije. Skala pokazuje brzinu vrtnje. Kod malih strojeva izbjegavamo razmjerno veliko dodatno opterećenje uobičajenim tahometrima na taj način, što postavimo na temeljnu ploču mjerilo frekvencije s jezičcima, koje pokazuje broj okretaja stroja na sekundu. Upotrebljavamo također i stroboskopske metode. Kod ovih možemo na pr. udešavanjem frekvencije bljeskova postići, da osovina ispitivanog stroja prividno miruje, pri čemu je frekvencija bljeskova neposredna mjera za brzinu vrtnje.

Točna mjerenja tahometrom moguća su, ako ga neposredno prije toga »baždarimo« ne odviše malim asinhronim motorom u praznom hodu ili sinhronim strojem. Ako su ovi strojevi priključeni na mrežu, koja točno drži frekvenciju, možemo uz vrlo malu pogrešku uzeti, da im je brzina vrtnje jednaka sinhronoj brzini vrtnje. Promatramo pogrešku očitanja mjernog instrumenta, te je uzimamo u obzir kod idućih mjerenja, koja izvodimo kod iste brzine.

Mjerenje vibracija. Nebalansiranost i magnetičke nesimetrije mogu izazvati nemiran hod stroja, koji će se pogoršati osobito onda, ako je jedna od vlastitih frekvencija titranja stroja jednaka ili gotovo jednaka frekvenciji, koja uzbuđuje titranje. Općenito možemo smatrati dopuštenima amplitude titraja od svega nekoliko stotinki milimetra. Promatranje vršimo najjednostavnije subjektivno, dodirivanjem rukom; za prosuđivanje potrebno je, istina, stanovito iskustvo. Čitav niz mjernih instrumenata omogućuje objektivno očitavanje ili registriranje vibracija. Jedna skupina osniva se u svom načinu rada na silama ubrzanja trome mase, druga radi na seizmografskom principu. Možemo se pomoći i mjernom urom, kojoj

stativ stoji na podlozi, koja ne titra, a mjerno ticalo joj prislonimo uz stroj, koji vibrira. Kazaljka titra amo-tamo, te možemo očitati dvostruku amplitudu titraja. Uvjet je za ispravno očitanje, da vlastita frekvencija titranja ure leži znatno iznad frekvencije vibracija, koje mjerimo. Mjernu uru možemo također povezati i s teškom masom, i držati je onda rukom. Vrlo mala vlastita frekvencija titranja elastične sile ruke i dodatne mase ne smeta kod mjerenja. Točna mjerenja i registracije vibracija dobivamo s pomoću instrumenata, koji su se pokazali dobrima u praksi, a lako je s njima baratati, kao na pr. mjerilom vibracija po Schencku, vibrografom po Geigeru i pisačem titraja Askanie. Prednost je ovih instrumenata, što rade bez daljnjeg pribora, napose bez pojačala.

Mjerenje šuma. U praksi ispitnih stanica upotrebljavamo najviše slijedeće instrumente, odnosno metode:

1. Subjektivno mjerilo šuma po Barkhausenu. U ovom instrumentu proizvodimo šum za usporedbu s pomoću posebnog izvora, kojemu možemo regulirati jakost. Ovaj slušamo jednim uhom, dok drugo uho prima šum stroja, koji ispitujemo. Kad nam se oba šuma čine jednako jakima, očitamo na skali jakost zvuka u fonima. Za kontrolu ponovimo mjerenje i s drugim uhom. Dobre rezultate dobivamo naravno samo onda, ako su šumovi međusobno slični.

2. Objektivno mjerilo šuma (Siemens-Halske). Kod ovog aparata šum stroja prima mikrofon, te ga dovodi pojačalu, koje ima sliku frekvencije prilagođenu onoj uha. Mjerni instrument priključen na zadnju cijev pokazuje jakost zvuka u fonima. Umjesto ovoga možemo priključiti oscilograf ili registracioni instrument.

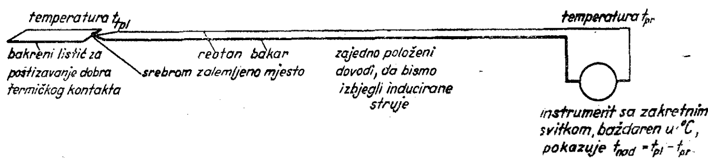
3. Kod metode s pomoću tona za traženje, superponiramo šumu, koji prima mikrofon, čisti ton promjenljive frekvencije. Iz superpozicije izdvojimo sitom sumu ili razliku parcijalnih titraja šuma i tona za traženje, pojačamo je i dovodimo odgovarajućem mjernom instrumentu ili oscilografu. Snimanje izvodimo tako, da u nekoliko sekunda promijenimo ton za traženje od najniže do najviše frekvencije. Kao rezultat dobivamo parcijalne tonove po veličini i frekvenciji, dakle t. zv. spektar šuma, te možemo doći do važnih zaključaka o postanku šuma.

Mjerenje temperature. Temperaturu pojedinih dijelova stroja određujemo za vrijeme trajnog rada termometrom s tekućinom, termoelementima i rjeđe ugrađenim otporničkim termometrima.

T e r m o m e t r i s t e k u ć i n o m za upotrebu kod električkih ispitivanja punjeni su najbolje alkoholom; termometri sa živom imaju manu, da kod loma može lako doći do isparivanja žive ili do spoja među dijelovima pod naponom. Osim toga vrlo je teško odstraniti kapljice žive iz stroja.

Za besprijekorno mjerenje važan je dobar termički kontakt s mjestom mjerenja, koji možemo poboljšati omatanjem kuglice termometra staniolom. Isijavanje prema van i pristup zraka, koji hladi možemo spriječiti obljepljivanjem mjesta mjerenja pustom. Treba paziti na lako očitavanje skale; zbog toga treba unaprijed cijev termometra smjestiti u odgovarajući zgodan položaj. Ako kod svakog očitanja moramo termometar izvaditi i opet vratiti, nema garancije za nepromijenjeni termički kontakt, te pojedina očitanja mnogo odstupaju.

T e r m o e l e m e n t. Mjerenje temperature termoelementom osniva se na pojavi EMS, nazvane termonaponom na krajevima dvaju različitih metala, koji su na drugom kraju spojeni lemljenjem ili varenjem, a mjesto spoja je izloženo povećanoj temperaturi. Sl. 216 prikazuje spoj. Na cca 5 mm široki i 20 mm dugi bakreni listić zalemljena je kapljicom na pr.

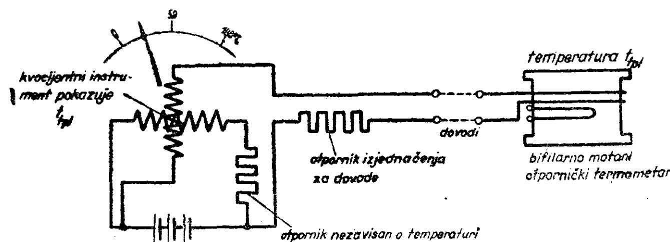


Sl. 216. Termcelement od reotana i bakra (termonapon 3,5 mV kod 80° nadtemperature).

žica od bakra i žica od reotana. Obje žice priključimo — najbolje neposredno — na osjetljivi milivoltmetar. Kod veće udaljenosti smijemo upotrebiti za produženje samo iste metale ili metale istog termonapona, da bismo izbjegli pogreške zbog daljnjih termonapona na spojnim mjestima. Instrument pokazuje napon, koji je proporcionalan razlici temperatura na lemljenom mjestu i u okolini mjernog instrumenta. Dobivamo dakle, ako je skala baždarena u °C, nadtemperaturu mjesta mjerenja prema prostoriji. Položimo li termoelement do instrumenta, mora očitanje biti nula. Kod gore navedenih metala iznosi termonapon kod 80° nadtemperature cca 3,5 mV. U praktičkoj upotrebi dajemo prednost termoelementima u slučajevima, gdje je postavljanje staklenih termometara vezano s poteškoćama. To vrijedi osobito na pr. kod potpuno zatvorenih strojeva, kod kojih možemo zgodno smjestiti termoelemente na glavi statorskog namota i na željezu statora, dok izvode vodimo iz stroja kroz malu bušenu rupu.

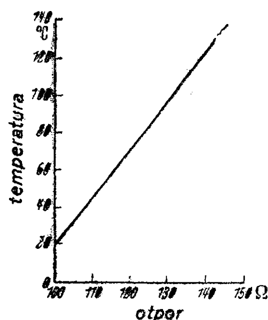
Treba izbjeći induciranje vrtložnih struja u bakrenom listiću, no općenito se u tom pogledu ne treba mnogo bojati. Kod upotrebe više elemenata, praktično je uzeti priključnu letvicu u vezi s preklopkom, što nam omogućuje očitavanje s pomoću jednog jedinog instrumenta sa zakretnim svitkom.

Otpornički termometar. Kod ove metode mjerimo povećanje otpora metalne žice stavljene na mjesto zagrijavanja. Ovo je mjera za povećanu temperaturu na tom mjestu. U ispitnoj stanici malo se time služimo, ali velike strojeve često opremamo otporničkim termometrima u cilju stalne kontrole temperature. Povećanje otpora određujemo u jednom



Sl. 217. Otpornički termometar, s kvocijentnim instrumentom, kojemu je skala baždarena u °C.

od različitih mosnih spojeva, s pomoću kvocijentnih instrumenata (na pr. instrument s unakrsnim svicima prema sl. 217) ili kompenzatorom. Temperaturu dobivamo preko krivulje baždarenja $t^0 = f(R_{tpl})$, ili baždarimo skalu neposredno u °C.



Sl. 218. Krivulja baždarenja platinskog otporničkog termometra

Od metala najradije upotrebljavamo nikalj i platinu, kod kojih povećanje otpora po 1° C iznosi okruglo 0,68, odnosno 0,395%. Mjerna struja u otporničkom termometru ne smije prelaziti nekoliko desetaka mA, da bismo izbjegli nedopuštena dodatna zagrijavanja. Otpor termometra iznosi 100 ili 10 Ω kod 20° C. Termometar s platinom ima kod povećanja temperature od 100°, dakle kod temperature od 120°, otpor od 139,5 odnosno 13,95 Ω, a termometar s nikljem otpor od 168, odnosno 16,8 Ω. Sl. 218 prikazuje krivulju baždarenja za platinu.

Tlak i brzina zraka. Razlikujemo statitički tlak p_{stat}, dinamički tlak p_{din} i ukupni tlak p_{uk}.

Statički tlak pojavljuje se kao tlak na stijenke, uz koje paralelno struji zrak. Možemo ga mjeriti kao apsolutni tlak barometrom ili kao pretlak manometrom s dobro zaobljenim otvorom, uz koji zrak nesmetano struji. Statički pretlak zraka u električkim strojevima kreće se približno između 30 i 50 mm s. v.; kod vrlo energično ventiliranih strojeva može iznositi do 120 mm s. v. i više.

Dinamički tlak jednak je pritisku, koji je potreban, da bi ubrzao zrak od mirovanja do njegove brzine; vrijedi:

$$p_{din} = \frac{v^2 \gamma}{2g} \approx \frac{v^2}{16} \text{ u mm s. v.,}$$

gdje je v = brzina zraka u m/sek,
γ = specifična težina zraka u kg/m³,
g = 9,81 m/sek².

Ukupni tlak sastoji se od oba tlaka zajedno:

$$p_{uk} = p_{stat} + p_{din}.$$

Ovaj se pojavljuje ispred zapreka, koje stoje na putu zraku, koji struji, te ga mjerimo kao najveći tlak na onom mjestu pogođene zapreke, gdje se struja zraka dijeli. Tamo dakle smjestimo mjerni otvor manometra.

Kao instrumente za mjerenje upotrebljavamo, među ostalima, Prandtlovu cijev i Krellov manometar. Ovima možemo mjeriti, kako statički i ukupni, tako i dinamički tlak.

Za određivanje dinamičkog tlaka služe isključivo vrlo zgodni instrumenti za mjerenje upornog tlaka, kod kojih skala neposredno pokazuje brzinu zraka. Ova je vezana s dinamičkim tlakom prema jednadžbi:

$$v = \sqrt{16 \cdot p_{din}}.$$

Brzinu zraka možemo neposredno odrediti anemometrima s lopaticama ili s krilima, kod kojih mjerimo broj okretaja u jedinici vremena.

Mjerenje zakretnog momenta. Zakretni moment, koji se pojavljuje na osovini ispitivanog stroja, radije određujemo neposredno mehanički, nego posredno iz struje i toka (uzbudne struje) ili snage i brzine vrtnje stroja, koji rotira. Osim metoda s električkim i mehaničkim kočnicama, koje su opisane u I. dijelu, određujemo kod mirovanja zakretni moment jednostavnom polugom, koja je čvrsto nasađena na osovinu stroja, ili kod rotacije torzionim štapom po Viewegu.

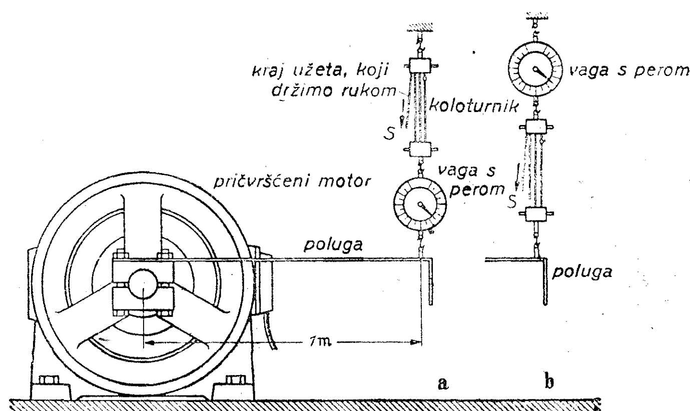
M j e r e n j e m o m e n t a p o l u g o m. Poluga, točno određene dužine od sredine osovine do hvatišta sile, nasađena je na osovinu stroja, te pritište na vagu s pločom ili vuče, kao na sl. 219, preko koloturnika vagu s perom. Moment, koji razvija motor, dobivamo:

zakretni moment u mkg = (duljina poluge u m) · (sila u kg)

$$M = l \cdot P.$$

Ne treba zaboraviti, da sila mora na polugu, koja leži horizontalno, djelovati vertikalno. Uvrstiti smijemo samo onu silu, koju faktično daje motor. Prije samog mjerenja treba zato očitati otklon, koji dobivamo zbog neizjednačenih težina u uređaju, te ga treba na odgovarajući način

uzeti u obzir. Ove neizjednačene težine moraju djelovati u smislu zakretnog momenta motora, da bismo mogli mjeriti vagom s perom. Kod upotrebe dvokrake poluge, koja se preporučuje iz razloga sigurnosti (obratan smjer vrtnje motora), potrebno je gdjekada u tu svrhu dodati još težine na strani vage. Koloturnik omogućuje, da postavimo rotor motora, polaganim popuštanjem užeta za vrijeme mjerenja, u različite položaje, da bismo mogli odrediti moment, koji eventualno koleba. Zadovoljavamo se očitanjem maksimalne i minimalne vrijednosti i uzimamo kao pravu vrijednost momenta srednju vrijednost iz oba očitanja. Treba uzeti u obzir, da slobodni kraj užeta kod rasporeda *b* ne smijemo rukom vući u smjeru prema polugi, jer bismo inače mjerili i silu zadržavanja *S*, koja



Sl. 219. Mjerenje zakretnog momenta pri mirovanju
Rasporedom *a* izbjegavamo pogreške zbog ručne sile *S* na slobodnom kraju užeta. Kod rasporeda *b* nastaje pogreška, ako slobodni kraj užeta ne držimo horizontalno.

potječe od ruke. Horizontalnim povlačenjem ili rasporedom *a* možemo ovu pogrešku lako izbjeći. Utjecaj sile trenja možemo isključiti tako, da mjerimo moment kod dizanja i kod spuštanja poluge na istom mjestu, te uzmemo srednju vrijednost obaju rezultata. Kod asinhronih motora s kugličnim ili valjkastim ležajima, koji najčešće dolaze na ispitivanje, trenje nema velikog značenja; utjecaj mu je manji od normalne pogreške vage s perom.

Upotreba vage s pločom omogućuje točnije određivanje sile, no teško je odrediti moment kod različitih položaja rotora. Osim toga, vaga je znatno osjetljivija na prvi udarac kod uključivanja motora nego što je to vaga s perom.

M j e r e n j e   z a k r e t n o g   m o m e n t a   t o r z i o n i m   š t a p o m   p o   V i e w e g u. Ova metoda mjerenja preporučuje se osobito kod snimanja karakteristike zakretni moment - brzina vrtnje istosmjernih strojeva u posebnim spojevima, što ih upotrebljavamo na pr. za brodske po-

moćne strojeve i dizala. Torzioni dinamometar sastoji se uglavnom od tankog čeličnog štapa visoke kvalitete, koji je uključen u mehanički prijenos sile. Kad se pojavi zakretni moment, presjeci štapa će se međusobno zakrenuti. Taj zakret proporcionalan je sa zakretnim momentom, ako nije prekoračena granica proporcionalnosti. Međusobni zakret obaju upetih presjeka možemo promatrati na pr. prikladnim optičkim uređajem, a pripadnu vrijednost momenta u mkg dobivamo iz statički određene krivulje baždarenja. Za pojedine mjerne opsege moramo upotrebiti šipke različitih debljina. Vrlo praktičan uređaj za upotrebu u ispitnim stanicama dobivamo, ako torzioni dinamometar sam za sebe postavimo između dva čvrsta ležaja na vlastitoj temeljnoj ploči. S jedne strane priključimo posebnom spojkom osovinu koja tjera, a s druge strane gonjenu osovinu. Malu pogrešku, koja nastaje zbog dodatnih gubitaka u ležajima i spojkama, smijemo obično bez daljnjega zanemariti.

DODATAK: FORMULE[1]

Inducirani napon

Istosmjerni stroj

$$U = z \cdot \frac{2p}{2a} \cdot \frac{n}{6000} \cdot \Phi \, .$$

Trofazni kolektorski stroj, statorski pojen

$$U_\Phi = \frac{z}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2p}{2a} \cdot \frac{n_{sin}}{6000} \cdot \Phi \cdot s \, .$$

Trofazni kolektorski stroj, rotorski pojen

$$U_\Phi = \frac{z}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2p}{2a} \cdot \frac{n_{sin}}{6000} \cdot \Phi \, .$$

Jednofazni kolektorski stroj

$$U = \frac{z}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2p}{2a} \cdot \frac{n}{6000} \cdot \Phi \, .$$

Trofazni namoti (za broj utora po polu i fazi > 2)

$$U = 4{,}24 \cdot w \cdot \frac{f}{100} \cdot \Phi_1 \cdot f_s \, , \qquad f_s = \sin\left(\frac{S}{\tau_p} \cdot 90^\circ\right),$$

$$4{,}24 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot \frac{3}{\pi} .$$

Transformator

$$U = 4{,}44 \quad w \cdot \frac{f}{100} \cdot \Phi, \qquad 4{,}44 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} .$$

Otpor

$$R = \frac{l}{q \cdot \varkappa}, \quad \varkappa = \varkappa_{20^\circ} \cdot \frac{20 + T}{t_{tpl} + T}, \quad \frac{R_{tpl}}{R_{hl}} = \frac{t_{tpl} + T}{t_{hl} + T}$$

$\varkappa$ i T vidi tabelu.

[1] Oznake vidi na str. 355.

Zagrijavanje

Razrada pokusa trajnog rada kod namota od bakra

$$t_{nad} = \frac{R_{tpl} - R_{hl}}{R_{hl}}\left(235 + t_{hl}\right) - \left(t_{pr_{tpl}} - t_{thl}\right),$$

$$t_{nad} = \frac{R_{tpl} - R_{hl}}{R_{hl}}\left(235 + t_{hl}\right) - \left(t_{rashl} - t_{hl}\right).$$

Čista akumulacija topline (na pr. u kratkom spoju)

$$t_{nad} = \frac{j^2 \cdot t}{\frac{c}{1000} \cdot \gamma \cdot \varkappa}, \quad c,\ \gamma,\ \varkappa \text{ vidi tabelu.}$$

Gubici u namotu

Iz otpora i struje

$$N_{Cu} = I^2 \cdot R\,,$$

iz gustoće struje i težine

$$N_{Cu} = \frac{j^2 \cdot G \cdot 10^3}{\gamma \cdot \varkappa} \approx 2 \cdot j^2 \cdot G \quad \text{za bakar kod } 20^0,$$

$$\approx 2{,}4 \cdot j^2 \cdot G \quad \text{za bakar kod } 75^0.$$

Zalet

$$M = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}, \qquad 375 = \frac{4 \cdot 9{,}81 \cdot 60}{2\pi}.$$

Zaustavljanje

$$GD^2 = \frac{N_{koč} \cdot T_1}{\left(\frac{n_1}{604}\right)^2} \qquad 604 = \frac{600\sqrt{10}}{\pi}$$

Zakretni moment

$$M \text{ (u mkg)} = \frac{973}{n} \cdot N_{(kW)} = \frac{716}{n} \cdot N_{(KS)}, \qquad 973 = \frac{60000}{9{,}81 \cdot 2\pi},$$

$$716 = \frac{4500}{2\pi}$$

Kinetička energija

Masa, koja se giba

$$E \text{ (u Ws)} = \frac{1}{2} \cdot Gv^2.$$

Masa, koja rotira

$$E\,(\text{u Ws}) = \frac{GD^2 \cdot n^2}{730}, \qquad 730 = 8\left(\frac{60}{2\pi}\right)^2.$$

Preračunavanje jedinica za rad i snagu

Rad

1 mkg $= 9{,}81$ Ws $= \frac{1}{427}$ kcal, 1 KSh $= 632$ kcal,

1 Ws $= 0{,}102$ mkg $= \frac{1}{4180}$ kcal, 1 kWh $= 860$ kcal,

1 kcal = 4180 Ws = 427 mkg.

Snaga

1 mkg/sek = 9,81 W,
1 KS = 75 mkg/sek = 0,736 kW,
1 kW = 102 mkg/sek = 1,36 KS.

Tabela

	Specifična težina γ	Specifična toplina Ws/° kg c	Vodljivost u m/Ω mm² $\varkappa$		Negativna temperatura, kod koje bi otpor postao gotovo jednak nuli* T
			kod 20°	kod 75°	
bakar	8,90	390	57	46,8	235
aluminij	2,70	920	36	29,8	245
mjed (Me 63)	8,45	385	15	13,9	700
valjano željezo	7,86	480	7	5,5	184

OZNAKE

$2a$ = broj paralelnih grana = 2 kod jednovojnog valovitog namota,
= $2p$ kod jednovojnog petljastog namota.

c = specifična toplina u Ws/° kg

E = kinetička energija u Ws

f = frekvencija u Hz

f_s = faktor skraćenja

G = težina u kg

GD^2 = zamašni moment u kgm²

* Ovu treba smatrati kao pomoćnu računsku, a ne kao fizikalnu veličinu (nap. prev.).

j = gustoća struje u A/mm²
I = jakost struje u A
$\varkappa$ = vodljivost u $\frac{m}{\Omega\, mm^2}$
$\varkappa_{20^0}$ = vodljivost kod 20° C
l = dužina u m
M = zakretni moment u mkg
$N_{koč}$ = kočna snaga (kod zaustavljanja) u kW
$N_{(kW)}$ = snaga u kW
$N_{(KS)}$ = snaga u KS
n = brz na vrtnje u okr/min
n_1 = brzina vrtnje u okr/min kod zaustavljanja, koja pripada fiktivnom trajanju zaustavljanja T_1
n_{sin} = sinhrona brzina vrtnje u okr/min $= \frac{120 \cdot f}{2p}$
$\frac{dn}{dt}$ = ubrzanje, odnosno usporenje u $\frac{okr/min}{sek}$
$2p$ = broj polova
q = presjek u mm²
R = otpor u Ω
R_{tpl} = otpor kod temperature t_{tpl}
R_{hl} = otpor kod temperature t_{hl}
s = klizanje $= \frac{s\%}{100} = \frac{n_{sin} - n}{n_{sin}}$
t = vrijeme u sek
t_{hl} = temperatura namota kod hladnog mjerenja otpora u °C
t_{tpl} = temperatura namota kod toplog mjerenja otpora u °C
$t_{pr_{tpl}}$ = temperatura prostorije kod toplog mjerenja otpora u °C
t_{rashl} = ulazna temperatura rashladnog sredstva u °C
t_{nad} = nadtemperatura u °C
T_1 = fiktivno trajanje zaustavljanja u sek za brzinu vrtnje n_1
τ_p = polni korak u cm
T = negativna temperatura, kod koje je otpor gotovo jednak nuli
U = inducirani napon jedne faze odnosno između četkica u V
U_Φ = inducirani dijametralni napon između četkica udaljenih za 1 polni korak u V
N_{Cu} = gubici strujne topline u namotu u W
v = brzina u m/sek
S = širina svitka u cm
w = djelotvorni broj zavoja po fazi
z = ukupni broj vodiča istosmjerne armature
γ = specifična težina
Φ = magnetski tok u 10⁶ maksvela
Φ_1 = osnovni val toka Φ

K A Z A L O

Izdavačko poduzeće »Školska knjiga« —
Zagreb, Prilaz Jug. Armije 2
Za izdavača: dr. E. Musić
Tehnička redakcija: Z. Orban
Naklada 3000 primjeraka